



Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

José Helmer Martínez Aldana

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería Departamento de Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2019

Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

José Helmer Martínez Aldana

Tesis de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Mecánica

Director (a):

Ph.D. Jhon Jairo Olaya Flórez

Codirector (a):

M.Sc., Johnny Franklin Obando Baquero

Línea de Investigación:

Ingeniería de Superficies

Grupo de Investigación:

Análisis de Fallas, Integridad y Superficies. AFIS

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2019

A mi madre Hilda María, mis hermanas Angie, Sandra, Olga y sobrinos David, tayre, mía Isabela, thiago, por su compañía en esos momentos buenos y no tan buenos de la vida.

La vida es un viaje, siempre va haber algún obstáculo pero con sentido común, se abrirán otros lugares.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi madre Hilda María Aldana, por su cariño, apoyo incondicional habría sido posible culminar esta etapa de investigación. A mi hermana Angie carolina por escuchar y darme consejos para mejorar cada día más.

Por el apoyo académico, conocimiento que me brindaron por el progreso de formación de maestría, mi director de tesis, Doctor Jhon Jairo Olaya Flórez y codirector de tesis MSc Johnny Franklin Obando Baquero

A la Universidad Incca de Colombia por los servicios de laboratorios de tratamientos térmicos sede IV. Laboratorios de la sede XII Planta Metalmecánica, sus máquinas herramientas, equipos de soldadura, por facilitarme el avance eficaz del proceso de recubrimientos duros y Mecanizado de los insertos de corte.

A Fabio Vallejo por sus conocimientos, aportes, sugerencias en el proceso de mi tesis

A los laboratorios de mecánica sala CAM coordinador, profesor Ernesto Córdoba Nieto y su laboratorista Juan Sebastián Echavarría Ramos, por su facilitarme su equipo de medición de herramientas Zoller.

A Marcela Aguiar Urriago, Coordinador técnico. Equipo MEB Universidad ECCL, por su disposición y colaboración.

A los Ingenieros Juan Manuel Amezcua, Francisco Marín Quiroga, Rigoberto Sánchez, que me han conducido parte de mi formación laboral, académica profesional.

A Nefaida Uribeles navarro compañera de Unincca por su apoyo, sus consejos en mi ciclo de formación y personal.

A mis amigos Cristian, Oscar, Ricardo, Jairo por su ayuda y por esa amistad incondicional.

Resumen

Generalmente, las herramientas de corte presentan problemas en su vida útil, (desgaste en el flanco, fisura y fractura), durante el maquinado en condiciones como herramientas de aceros rápidos utilizados principalmente en la industria metalmecánica. Los recubrimientos ofrecen excelentes propiedades mecánicas para ser usados sobre insertos de corte de acero fabricados para herramientas. En esta tesis, se produjeron recubrimientos de carburos de niobio y vanadio sobre insertos fabricados de acero herramienta AISI M2 mediante la técnica de deposición por difusión termoreactiva (TRD), con la mezcla de sales de bórax pentahidratado a temperaturas hasta los 1050°C durante 4 horas, en un horno industrial. Se realizó tratamiento térmico de templado a insertos fabricados sin recubrir a temperatura de 1050°C por cinco minutos y revenido a 540°C por 10 minutos.

Los recubrimientos se caracterizaron mediante difracción de rayos x (DRX), espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) y microscopia electrónica por barrido (MEB), con el fin de estudiar la formación de fases-estructura cristalina, la composición química y la morfología del recubrimiento, respectivamente. Se evaluaron las condiciones de desgaste del inserto recubierto a revenidos de 540°C durante 10 minutos y 1 hora en parámetros de velocidad de corte (V_c) por fresado de 20, 30, 40 y 60 m/min con el maquinado de platinas de acero AISI 4140 y AISI 1045. En insertos sin recubrir con revenido 540°C por 10 minutos se maquina material de trabajo acero AISI 4140.

Los resultados por DRX mostraron la formación de carburos de niobio-vanadio con una estructura FCC. Mediante MEB, se observó una morfología atacada con granos equiaxiales y columnares, con capa homogénea de carburos binarios de NbC-VC con regularidad de espesor de $9,86 \pm 0.08 \mu\text{m}$. La microdureza $HV_{0.25}$ promedio del recubrimiento fue de 2103 Vickers.

Después de los ensayos de maquinado, los insertos con revenido de 10 minutos presentaron un desgaste en el flanco de corte VB de 0.255 mm a una V_c de 60 m/min en acero AISI 4140. Aunque Los insertos con revenido por 1 hora evidenciaron bajo desempeño al corte con mayor desgaste en el flanco, esto se debe a la disminución de su

dureza. Sin embargo en los insertos sin recubrir mostraron un mayor desgaste y poca eficiencia en el corte con el maquinado de acero AISI 4140.

Palabras clave: Deposición por difusión termoreactiva (TRD), Carburo de niobio (NbC), Carburo de vanadio (VC), Recubrimientos Duros, Inserto, Mecanizado, Desgaste.

Abstract

Generally, the cutting tools present problems in their useful life, (wear in the flank, fissure and fracture), during the machining in conditions as tools of fast steels used mainly in the metalworking industry. Coatings offer excellent mechanical properties to be used on cutting steel inserts. This thesis proposes the fabrication of coatings of niobium and vanadium carbides were produced on inserts made of AISI tool steel by the thermoreactive diffusion deposition (TRD) technique, with the mixture of borax salts pentahydrate at temperatures up to 1050 ° C for 4 hours, in an industrial furnace. The coatings produced were used on AISI M2 tool steel. Hardening heat treatment was performed on inserts manufactured without coating at a temperature of 1050°C for five minutes and tempered at 540°C for 10 minutes.

The coatings were characterized by X-ray diffraction (DRX), dispersive energy X-ray spectroscopy (EDS) and scanning electron microscopy (SEM), to study the formation of the crystalline phases-structure, chemical composition and coating morphology, respectively. The wear conditions were evaluated for the insert tempered at 540°C for 10 minutes and 1 hour in parameters of cutting speed (V_c) by milling of 20, 30, 40 and 60 m / min with the machining of AISI 4140 and AISI 1045 steel plates. In inserts uncoated with tempering 540 ° C for 10 minutes, AISI 4140 steel work material was machined.

The results by XRD showed the formation of niobium-vanadium carbides with an FCC structure, while the SEM showed a morphology attacked with equiaxate and columnar grains, with a homogeneous layer of binary carbides of NbC-VC with a regular thickness of $9.86 \pm 0.08 \mu\text{m}$, average $HV_{0.25}$ microhardness of the coating was 2103 Vickers.

After the machining tests, the ten-minute tempered inserts showed wear on the VB cutting edge of 0.255 mm at V_c of 60 m / min in AISI 4140 steel. However, inserts tempered for 1

hour showed low cutting performance with greater flank wear, due to the decrease in their hardness. However, the uncoated inserts showed greater wear and poor cutting efficiency with the AISI 4140 steel machining.

Keywords: Diffusion termoreactiva deposition **TRD**, Niobium carbide (NbC), Vanadium carbide (VC), hard coating, insert, machining, wear.

Contenido

	Pág.
1. Fundamento teórico.....	5
1.1 Antecedentes internacionales	5
1.1.1 Antecedentes nacionales.....	8
1.2 Aspectos que intervienen al recubrimiento superficial	9
1.2.1 Composición química del sustrato	10
1.2.2 Propiedades mecánicas del sustrato	11
1.3 Deposición por difusión termoreactiva (TRD)	11
1.3.1 Mecanismo de formación de la capa.....	13
1.3.2 Tiempo de inmersión	14
1.3.3 Elementos de formación de carburos.....	15
1.3.4 Elemento endurecedor ferroniobio.....	16
1.3.5 Elemento endurecedor ferro-vanadio.....	17
1.4 Mecanismos de desgaste.....	18
1.4.1 Desgaste adhesivo	18
1.4.2 Desgaste abrasivo	19
1.4.3 Tipos de desgaste en herramienta de corte	20
1.5 Mecanizado de corte por fresadora	22
1.5.1 Tipos de desgaste de inserto	24
1.6 Técnicas experimentales de caracterización	26
1.6.1 Difracción de rayos X (DRX)	26
1.6.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	29
1.7 Microscopia óptica.....	30
1.8 Microdureza	31
1.9 Metalografía de la muestra.....	32
1.10 Caracterización del mecanizado.....	34
1.10.1 Fresado planear con insertos de corte.....	34
1.10.2 Evaluación de desgaste.....	35
1.10.3 Medición de herramientas de corte.....	39
1.10.4 Parámetros de corte de fresado.....	40
2. Desarrollo experimental.....	47
2.1 Material acero herramienta AISI M2	47
2.1.1 Diseño inserto AISI M2	47
2.2 Deposición por difusión termo reactiva (TRD)	48
2.3 Caracterización de recubrimientos por TRD	51
2.3.1 Difracción de rayos X (X)	51
2.4 Material de trabajo.....	51
2.4.1 Acero AISI 4140.....	52
2.4.2 Acero AISI 1045.....	52

XII Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

2.4.3	Microscopia electrónica de barrido	53
2.4.4	Microscopia óptica.....	53
2.5	Pruebas de mecanizado	54
2.5.1	Procedimiento de experimentos en insertos	54
2.5.2	Medición de desgaste en filos de corte de insertos	57
3.	Análisis y resultados	59
3.1	Análisis morfológico	59
3.1.1	Capa	62
3.2	Composición química del recubrimiento-sustrato	64
3.3	Microdureza	66
3.4	Análisis microestructural	69
3.5	Análisis de desgaste del inserto.....	71
4.	Conclusiones y recomendaciones	83
4.1	Conclusiones	83
4.2	Recomendaciones	84

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.1 Espesor de capa para boruro de Nb sobre un acero M2 e imagen MEB a 900°C 2h. [14].	6
Figura 1.2 Imagen MEB de la sección transversal del espécimen con recubrimiento TiN [15].	7
Figura 1.3 Requerimientos de composición química para acero herramienta M2 por ASTM A600-92ª [34].	10
Figura 1.4 Espesor de la capa de Nb-V sobre un sustrato aceros D2 en función de la temperatura y el tiempo por la técnica TRD. [18].	11
Figura 1.5 Esquema del ciclo típico por la técnica TRD Fuente: Autor.	13
Figura 1.6 Esquema general del proceso de deposición por difusión termoreactiva. [35]	13
Figura 1.7 Esquema del mecanismo de formación de la capa de carburos por la técnica TRD. Fuente: Autor.	14
Figura 1.8 Relación entre espesor vs tiempo de tratamiento de carburo de vanadio. [23]	15
Figura 1.9 Ferro-niobio-Pyrochlore concentrado de la mina Niobe, en Canadá. Los cuadrados visibles son en papel de 2 mm de tamaño [45].	16
Figura 1.10 Ferro-vanadio. Fuente: ACOMET. [47]	17
Figura 1.11 Mecanismos de desgaste: a) adhesivo, b) abrasivo, c) fatiga y d) químico. [50].	18
Figura 1.12 Formación de desgaste abrasivo: a) de dos cuerpos y b) de tres cuerpos. [54]	19
Figura 1.13 Tipos de desgaste en herramientas de corte: a) Desgaste en el flanco de un inserto herramienta de corte y b) borde aumentado por material de trabajo mecanizado. [55].	20
Figura 1.14 Esquema de partículas en desgaste abrasivo de una herramienta de corte durante el desprendimiento de viruta. [56].	20
Figura 1.15 Sección de la cara de filo de una herramienta HSS después del corte de material de trabajo acero inoxidable, al observar su acción abrasiva por partículas de TiCN. [57].	21
Figura 1.16 Desgaste en la herramienta de corte: a) nariz, b) de la cara de corte y c) área desgastada [58].	22
Figura 1.17 Máquina de Fresado CNC Marca Fadal VMC 15.Fuente: Unincca laboratorios.	23

Figura 1.18 Operación de fresado frontal y diferentes herramientas de corte para fresado. Fuente: Sandvik. [59]	23
Figura 1.19 Varias operaciones de fresado: planear, ranurado y escalonado. [55].....	23
Figura 1.20 Sentidos de corte de la operación de fresado: a) concordancia b) oposición. [61].....	24
Figura 1.21 Mecanismos de desgaste en herramienta de corte en HSS.[60]	25
Figura 1.22 Tipos de fallas en herramientas de corte en diferentes condiciones de corte: 1) esfuerzo plástico, 2) deformación, 3) desgaste por difusión, (cráter), 4) desgaste por deserción (astillado), 5) desgaste abrasivo y 6) deslizamiento (desgaste en la nariz).[61]	26
Figura 1.23 Reflexión de un haz de rayos X incidente por los planos (hkl) en ángulo Bragg θ y rayos reflejados que están en fase y se refuerzan entre ellos.[64]	27
Figura 1.24 Determinación de la intensidad de difracción mediante la anchura de pico a mitad de la altura (FWHM).[68]	28
Figura 1.25 Cálculo del tamaño de partícula mediante la ecuación de Scherrer empleando un pico y tamaños por microscopia electrónica MEB.[68]	29
Figura 1.26 Microscopio MEB ProX - Caracterización de recubrimientos de insertos. Fuente: Universidad ECCI 2018. [70],[71]	29
Figura 1.27 Interacción del haz de electrones con el espécimen o muestra. Fuente: Autor	30
Figura 1.28 Microscopio Óptico Compuesto – partes principales [74].	31
Figura 1.29 Esquema medición microdureza Vickers.[76]	31
Figura 1.30 Relación de la Metalografía entre la ingeniería a la ciencia. Dimensión m, cm, hasta un átomo Å.[79]	33
Figura 1.31 Diferentes montajes mecánicos con sujeción de tornillo.[78]	33
Figura 1.32 Nomenclatura de corte por fresado.[82].....	34
Figura 1.33 Nomenclatura y geometría de un inserto de corte.[82]	35
Figura 1.34 Diagrama esquemático del desgaste del flanco de una herramienta de corte.[90].....	36
Figura 1.35 Desgaste del flanco de un inserto de carburo en operación de fresado: a) VB1; b) VB2 y c) desgastes localizados VB3. [92]	37
Figura 1.36 Desgaste de herramienta en función del tiempo de corte.[93]	37
Figura 1.37 Relación entre el desgaste medio del flanco(VBB) y la velocidad de corte de corte (V) maquinando un acero inconel 718.[84]	38
Figura 1.38 Ancho del desgaste del flanco VB versus número de cortes desarrollados en insertos con recubrimiento a varias velocidad de corte Vc. [80]	39
Figura 1.39. Medición del inserto: a) máquina de medición de herramienta de corte y b) medición de un inserto de fresado. [85], [86].....	40
Figura 1.40 Desgaste por acumulación de material: a) Micrografía de la acumulación de viruta en el filo de la herramienta de corte y b) desgaste de un inserto PCD, debido a la transferencia de material de la pieza de trabajo.[98]	41
Figura 1.41 Operación de fresado: velocidad de corte (Vc), diámetro de la fresa (D), velocidad del husillo (n), profundidad de corte axial (a_p) – ancho de corte a_e . [101]	42

Figura 1.42 Avance por diente (f_z) y avance por revolución (f_n) de una fresa.....	43
Figura 1.43 Profundidad de corte a_p y ancho de corte a_e de una fresa de insertos intercambiables. Sandvik.[102].....	44
Figura 1.44 Suministro de refrigerante de corte en una operación de fresado.[96]	44
Figura 1.45 Factores que influyen en la vida de la herramienta en los procesos de fresado final. [101].....	45
Figura 2.1 Diseño de inserto (ángulos de corte) para recubrimientos TRD NbC- VC. Fuente: Autor	48
Figura 2.2 Tratamiento de recubrimiento a los insertos: a) horno para tratamiento térmico para técnica por TRD y b) horno tipo mufla utilizado para precalentamiento de insertos.	48
Figura 2.3 Montaje de insertos en crisol para recubrimientos por el proceso TRD.....	49
Figura 2.4 Esquema porta insertos para TRD: a) varillas roscadas 1/8", tuercas, crisol y portainsertos (mm) y b) ensamble total para el proceso TRD.	49
Figura 2.5 Esquema del proceso de recubrimiento por TRD sobre insertos de corte.	51
Figura 2.6. Porta insertos para maquinado: a) puesta de insertos de corte con recubrimientos NbC-VC y b) dimensiones de fresa planeadora ref. FP-3-I.[105].....	54
Figura 2.7 Programación de parámetros de maquinado CNC Fadal VMC 15s en condición de velocidad de corte 60m/min.	56
Figura 2.8 Esquema del proceso de maquinado a insertos con y sin recubrimiento.	57
Figura 3.1 Esquema de crecimiento y nucleación de recubrimientos de NbC y VC sobre sustratos: (a) actividad con bajo carbono (b) actividad con medio carbono y (c) actividad de alto carbono. V_h : crecimiento horizontal y V_l : crecimiento longitudinal. [107].....	60
Figura 3.2 Morfología atacada con solución $K_3[Fe(CN)_6] + 100\% H_2O$ de la sección transversal del recubrimiento de NbC-VC: Capa A),B) punto I sustrato acero M2, punto II grano equiaxial y punto III grano columnar del recubrimiento.	61
Figura 3.3 Imagen de electrones BSE, SE del inserto de la morfología superficial después de la técnica TRD a 1050°C por 4 horas: a) 1000X, b) 10000X	61
Figura 3.4 Patrón EDS de la capa superficial NbC-VC atacada.....	62
Figura 3.5 Sección transversal de recubrimientos por TRD de NbC-VC 4hr producidos en insertos de corte.....	63
Figura 3.6 Sección transversal de capa de NbC-VC con espesor de capa entre 8,54µm y 9,86µm	63
Figura 3.7 Imagen MEB de la capa superficial de NbC-VC X700X de un acero M2 con posible presencia de poros.....	64
Figura 3.8 Micrografía de zonas puntuales para composición química en capa (NbC-VC) y sustrato.....	65
Figura 3.9 Espectros de zonas puntuales por EDS en sección transversal de inserto: (1),(2) capa de NbC-VC y (3) sustrato M2	65
Figura 3.10 Micrografía de zona superficial del recubrimiento NbC-VC	66
Figura 3.11 Ensayo de microdureza vickers HV sección transversal de recubrimiento duro de NbC, VC y sustrato M2. X400 micro durómetro SHIMADZU.....	67
Figura 3.12 Gráfica de microdureza versus distancia de la sección transversal capa de carburo NbC-VC con tratamientos de revenido de 540°C X 10 min y 540°C X 1 hora.	69

Figura 3.13 Espectros por difracción de rayos X: a) sustrato M2 y b) recubrimientos de NbC-VC por TRD	70
Figura 3.14 Inserto de NbVC N4 velocidad de corte 30 m/min maquinando acero 4140: a) desgaste del flanco y muesca 200X y b) análisis EDS.	71
Figura 3.15 Inserto de corte NbVC N4 -Vc 60 m/min: a) 200X, b) 660 X, c) 1900X desgaste de muesca y d) análisis EDS.	72
Figura 3.16 Inserto de corte NbVC N1 Vc 60m/min: a) desgaste por astillamiento 200X, b) desgaste de muesca 660 X, c) capa NbVC 1900X y d) análisis EDS de la capa.	73
Figura 3.17 Inserto de corte NbVC N1 esquina 2 Vc 30m/min: a)desgaste de flanco 200X, b) desgaste por borde aumentado 660 X, c) zona puntual (A) de la capa NbVC 1900X y d) análisis EDS	74
Figura 3.18 Micrografía MEB inserto NbVC, N3 desgaste flanco de corte adhesivo-abrasivo en a), b) y análisis EDS c) en el punto (II) Vc 30m/min, maquinando acero AISI 1045.....	75
Figura 3.19 Modelo CAD del filo de flanco de corte para evaluar desgaste (VB) luego del fresado final.	76
Figura 3.20 Medición de desgaste (VB) insertos grupo N1 NbC-VC 4hr Rev 540°X 10 minutos –maquinado acero 4140 a) 0,103mm, b) 0,177mm, c) 0,257mm y d) 0,255mm.	77
Figura 3.21 Medición de desgaste (VB) insertos grupo N2 NbC-VC 4hr Rev 540°X 1 hora –maquinado acero 1045: a) 0,059mm b) 0,242mm c) 0,249mm d) 0,250mm.	78
Figura 3.22 Medición de desgaste (VB) insertos grupo N3 NbC-VC 4hr Rev 540°X 10 minutos –maquinado acero 1045: a) 0,037mm, b) 0,244mm, c) 0,176mm y d) 0,073mm.	78
Figura 3.23 Medición de desgaste (VB) insertos grupo N4 NbC-VC 4hr Rev 540°X 1 hora –maquinado acero 4140 a) 0,044mm b) 0,279mm c) 0,235mm d) 0,271mm.	79
Figura 3.24 Desgaste del flanco VB de insertos sin recubrir N5, condiciones de corte: A) 20, B) 30, C) 40 y D) 60m/min.....	80
Figura 3.25 Relación entre el desgaste del flanco (VB) y la velocidad de corte (Vc) durante el mecanizado platinas acero 4140 de insertos: N1 recubiertos NbC-VC revenido 10 min, N4 recubiertos NbC-VC revenido 1 hora y N5 sin recubrir revenido 10 min.....	81
Figura 3.26 Relación entre el desgaste del flanco (VB) y la velocidad de corte (Vc) durante el mecanizado platinas acero 1045 de insertos: N2 recubierto NbC-VC revenido 1 hora y N3 recubierto NbC-VC revenido 10 min.	81

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Propiedades de acero M2.[37]	11
Tabla 1-2. Composición química del ferro-niobio en la empresa ACOMET[46]	17
Tabla 1-3. Composición química del ferro-vanadio de la empresa ACOMET [47]	17
Tabla 2-1. Análisis de composición química Acero M2 (S 600 Bohler).....	47
Tabla 2-2. Composición química de elementos para proceso TRD de insertos de corte. 50	
Tabla 2-3. Análisis químico del material de trabajo AISI 4140 (V320 Bohler).	52
Tabla 2-4. Análisis químico material de trabajo acero AISI/SAE 1045 (V 495 Bohler). ...	52
Tabla 2-5. División de procedimientos para el maquinado de materiales de trabajo.	55
Tabla 2-6. Parámetros de corte para grupos N1, N2, N3 N4 y N5 de mecanizado.....	55
Tabla 3-1. Composición química de zonas puntuales entre el sustrato (M2) y la capa (NbVC)	65
Tabla 3-2. Composición química de zonas puntuales del recubrimiento superficial de NbC-VC.....	66
Tabla 3-3. Resultados de microdureza vickers HV: sustrato, material de trabajo, insertos con y sin recubrimiento.....	68
Tabla 3-4. Medición al desgaste del flanco de corte (VB) longitud huella de maquinado de aceros AISI 1045, 4140 y tipo de desgaste despues del maquinado a insertos con y sin recubrimiento.	77

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI	Designación
T	Temperatura	°C	Capítulo 1.3.2
t	Tiempo	h/min	Capítulo 1.3.2
K	Coeficiente de difusión de los átomos de C	cm ² /s	Capítulo 1.3.2
d	Espesor	μm	Capítulo 1.3.2
Q	Energía de activación	KJ/mol	Capítulo 1.3.2
R	Constante de los gases	J/mol K	Capítulo 1.3.2
K ₀	Constante pre exponencial	cm ² /s	Capítulo 1.3.2
D	Diámetro de la partícula		Capítulo 1.6.1
K	Constante de Scherrer		Capítulo 1.6.1
β	Ancho del pico de difracción a la mitad		Capítulo 1.6.1
λ:	Longitud de onda monocromática		Capítulo 1.6.1
HV	Micro indentacion de dureza Vickers		Capítulo 1.8
F	Carga aplica a la muestra.	kgf	Capítulo 1.8
\bar{d}_v	promedio de diagonales de huella indentada	mm	Capítulo 1.8
VB	Desgaste del flanco de corte	mm	Capítulo 1.10.2
W	Desgaste	mm	Capítulo 1.10.2
μm	Micrómetros	μm	Capítulo 1.10.4
a _e	Profundidad de corte radial	mm/pulgada	Capítulo 1.10.4
a _p	Profundidad de corte axial	mm/pulgada	Capítulo 1.10.4
f _z	Avance por diente	mm/pulgada	Capítulo 1.10.4
f _n	Avance por revolución	mm/pulgada	Capítulo 1.10.4
n	velocidad del husillo	rpm	Capítulo 1.10.4
V _c	Velocidad de corte	m/min	Capítulo 1.10.4
V _f	Avance de mesa	mm/min	Capítulo 1.10.4
Z _c	Numero de dientes efectivos	unidades	Capítulo 1.10.4
D	Diámetro de la fresa	mm/pulgada	Capítulo 1.10.4

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Designación
α	Angulo	[°]	Capítulo 1.10.2
α_0	Angulo de inclinación alpha	[°]	Capítulo 1.10.2
γ_0	Angulo de inclinación gamma	[°]	Capítulo 1.10.2

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>TRD</i>	Deposición por difusión termo reactiva
<i>NbC</i>	Carburo de niobio
<i>VC</i>	Carburo de vanadio
<i>PVD</i>	Deposición física de vapor
<i>CVD</i>	Deposición química de vapor
<i>MEB</i>	Microscopio electrónico de barrido
<i>DRX</i>	Difracción de rayos X
<i>EDS</i>	Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva
<i>HV</i>	Dureza Vickers
<i>ASTM</i>	Sociedad Americana para pruebas y materiales
<i>ASM</i>	Sociedad Americana de materiales
<i>EFC</i>	Elementos de formación de carburos
<i>AISI</i>	Instituto norteamericano del hierro y el acero
<i>CNC</i>	Control Numérico Computarizado
<i>FCC</i>	Estructura cúbica centrada a la cara
<i>HSS</i>	Acero rápido de alta velocidad

Introducción

En la actualidad, se han realizado varias investigaciones sobre materiales en relación con la formación de capas duras superficiales, resistentes al desgaste, y conservando un núcleo tenaz a elevar sus características mecánicas. Estos resultados se obtienen mediante variables de la técnica de deposición, el tipo de material, cambio de temperatura y tiempo de tratamiento, que están siendo investigadas sobre aceros herramientas.

En el presente trabajo de tesis, se realiza la fabricación de insertos de corte eficaz para luego formar recubrimientos duros mediante el proceso de deposición por difusión termoreactiva al añadir elementos duros de niobio-vanadio sobre un material en alto porcentaje de carbón como sustrato. Es importante resaltar que investigaciones previas de recubrimientos en aceros herramientas han mostrado que el carburo de niobio, vanadio presenta buenas propiedades mecánicas de alta dureza, alta resistencia al desgaste y corrosión [1][2]. Se sumergen piezas en baños de sales fundidas añadiendo elementos de formación de carburos (EFC) a un ciclo de tiempo – temperatura en el que se propaga el carbono del material base hacia la superficie y produce un efecto endurecedor.

El acero herramienta se emplea para la fabricación de diversos tipos de procesos de manufactura, de equipos y piezas de corte [3]. La forma geométrica, dureza, resistencia a la deformación, desgaste y tenacidad son propiedades opuestas, no obstante, es importante encontrar una solución en conjunto. La fabricación de los insertos de corte-sustrato de material acero AISI M2 de alto contenido de carbono se toma de un diseño de

inserto de fresado de referencia SPKN 1203 [4]. El proceso de fabricación de los insertos fue de corte por aserrado en lámina de 4mm de espesor y fresado sobre medidas. Finalmente, se usa un acabado por máquina de afiladora de herramientas para afilar los respectivos ángulos de corte, con lo que estarán listos para su respectivo proceso de recubrimiento.

Se obtuvieron recubrimientos sobre insertos de acero herramienta M2, confirmando su concentración de elementos en varias pruebas de análisis de composición química (EDS). Se observó su morfología en sección transversal por microscopia electrónica de barrido (MEB) y se confirmaron los carburos binarios de NbC-VC en los recubrimientos por difracción de rayos X (DRX). Se realizan ensayos de microdureza Vickers HV en la capa en sección transversal.

Se evalúa el desgaste del flanco a los insertos recubiertos de acuerdo con el tiempo de revenido, condiciones de corte, velocidad del husillo, avance de la mesa y profundidad a maquinar. Estos tipos de desgaste de los insertos, luego del maquinado de materiales de trabajo aceros AISI 4140 y AISI 1045 [5],[6], se observa en un equipo de medición de herramientas Zoller[7], donde se evalúa el menor desgaste del flanco de corte (VB).

La tesis de investigación constará de cuatro capítulos. En el capítulo 1, se describe el fundamento teórico especificando los antecedentes nacionales e internacionales sobre las ventajas de la técnica TRD de recubrimientos duros sobre el tipo de aceros herramientas. Se muestran también las condiciones y elementos de formación de la capa, tipos de desgaste que se presentan en herramientas de corte, técnicas de caracterización de materiales, entre las que se destacan microdureza, DRX y MEB microscopia óptica. Finalmente, en este capítulo se fundamentan las definiciones de condiciones de corte, para evaluar la medición de desgaste del flanco del inserto (VB)

En el segundo capítulo, se presenta en el desarrollo experimental para seleccionar el acero herramienta, la fabricación del inserto y el proceso de la técnica TRD al recubrir elementos de formación de carburos de niobio y vanadio. Se enfatizan además las condiciones que se utilizarán en la caracterización del recubrimiento, las variables de corte y el método de medición lateral de la herramienta.

En el tercer capítulo, implica los resultados de los experimentos planteados en el anterior capítulo, con el análisis de la morfología de la capa confirmando su composición química de elementos de niobio y vanadio por EDS, la dureza obtenida en la capa-sustrato. Se analiza la microestructura granular del recubrimiento luego de del ataque con solución acuosa al 10% de hidróxido de potasio (KOH) + 10% de ferrocianuro de potasio $K_3[Fe$

(CN)₆] + 100% H₂O, con imágenes MEB se observa posible formación de granos acicular, equiaxiales. Se confirma por microscopía electrónica MEB el espesor del recubrimiento. Con patrones de difracción de rayos X (DRX) se evidencia los picos de NbC y VC, posterior al maquinado de los insertos se evidencia posibles tipos de desgaste de acuerdo a la condición de corte, analizando que inserto obtuvo mejor desempeño.

El capítulo 4 concluye con los resultados en el cometido del maquinado y recomendaciones para optimizar la técnica TRD y el tipo de recubrimiento de la herramienta de corte. Finalmente, se proponen nuevos interrogantes según los procedimientos de recubrimientos y maquinado por sugerir a posibles investigaciones.

Objetivos

Objetivo General

Producir recubrimientos de carburos de niobio (NbC) y carburo de vanadio (VC) en una herramienta de corte por la técnica de deposición por difusión termoreactiva, determinando su desgaste en el corte en un acero AISI 4140 y acero AISI 1045

Objetivos Específicos

1. Diseñar y fabricar insertos - herramienta de corte de un acero AISI M2.
2. Producir recubrimientos de carburos de Nb – V por la técnica de deposición por difusión termoreactiva (TRD) sobre insertos fabricados.
3. Caracterizar la microestructura de los recubrimientos producidos de niobio y vanadio mediante microscopia electrónica de barrido (MEB), Difracción de rayos X (DRX) y composición química por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS).
4. Realizar pruebas de maquinado de fresado planear por CNC a insertos recubiertos por TRD e insertos sin recubrir en función de parámetros de velocidad de corte, para evaluar su desgaste en el flanco de corte.

1. Fundamento teórico

1.1 Antecedentes internacionales

La técnica de deposición de recubrimientos duros para la técnica TRD [8], [9] es un método de recubrimiento sobre aceros con una capa de carburos, nitruros, o carbunitruros en aceros con alto porcentaje de carbono, dureza y resistencia al desgaste. La técnica TRD se ha usado en métodos convencionales de endurecimiento de revestimientos donde los elementos (carbono y nitrógeno) en un agente de tratamiento se difunden sobre el sustrato para su endurecimiento. A diferencia de los métodos de difusión convencionales, con el método TRD, el estudio [10] produce una acumulación de recubrimiento sobre el sustrato superficial con espesores de 5 a 15 μm similares a técnicas CVD y PVD.

El creador del proceso TRD, el Doctor Tohru Arai, trabajó en 1965 con los Toyota Central Research and Development Labs en una investigación que en 1968 comenzó a producir capas de carburo sobre un sustrato a una inmersión en baños de sales fundidas. [11][9], [11] La técnica fue llamada inicialmente “Toyota Diffusion” (TD) en Japón, luego “Thermal Diffusion” (TD) en Estados Unidos y finalmente “Thermo-Reactive Deposition/Diffusion” (TRD), que se traduce como “Deposición por difusión termoreactiva”. El proceso ha sido usado industrialmente en Japón desde 1969 en Toyota.

Los estudios desarrollados por Abakay y Sen [12] produjeron capas de Nb—Al-C-N sobre un acero M2 por la técnica TRD con tratamiento de deposición a 1000° C durante 4 horas. Como resultado, alcanzaron capas entre 6,65 y 9,05 μm . El análisis DRX mostró que los patrones de las fases en la muestra son Nb₂CN, NbN, AlN, Fe₃N, los cuales evidencian una formación pequeña y relativa de elementos de niobio y aluminio. El análisis de EDS muestra capas de recubrimiento de niobio y en otras zonas se confirma la difusión entre el

niobio y el acero del sustrato. La medición de dureza en la adición de aluminio en el baño incrementó su dureza entre 2350 ± 157 y 2636 ± 62 HK_{0.005}.

Oliviera, Muñoz Riofano y Casteletti [13] experimentaron con aceros AISI H13 y M2 para evaluar su resistencia al desgaste con recubrimientos depositados por TRD de NbC a 1000°C por 4 horas. Para analizar los recubrimientos obtenidos, utilizaron microscopia óptica, microscopia electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X (DRX), espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) y microdureza vickers HV. Para evaluar el desgaste abrasivo, se utilizó el método *ball-cratering*. Se observaron capas homogéneas con una excelente regularidad en el espesor y una dureza de 2333HV_{0.050} en acero H13 con NbC y de 2345 HV_{0.050} en acero M2 con NbC. Las capas presentaron además un espesor de capa mayor de 9 μm debido al porcentaje de carbono del sustrato.

En el estudio [14], se demostró la eficiencia de recubrimientos de boruro de niobio (NbB) al utilizar la técnica TRD sobre un acero M2. Se obtuvieron capas homogéneas, compactas, microdureza de 2738 ± 353 HV de diferentes fases de boruros halladas como Nb₃B₂ y Nb. Por análisis DRX, se evidencia el crecimiento de la capa al variar parámetros de tiempo y temperatura como se demuestra en la Figura 1.1.

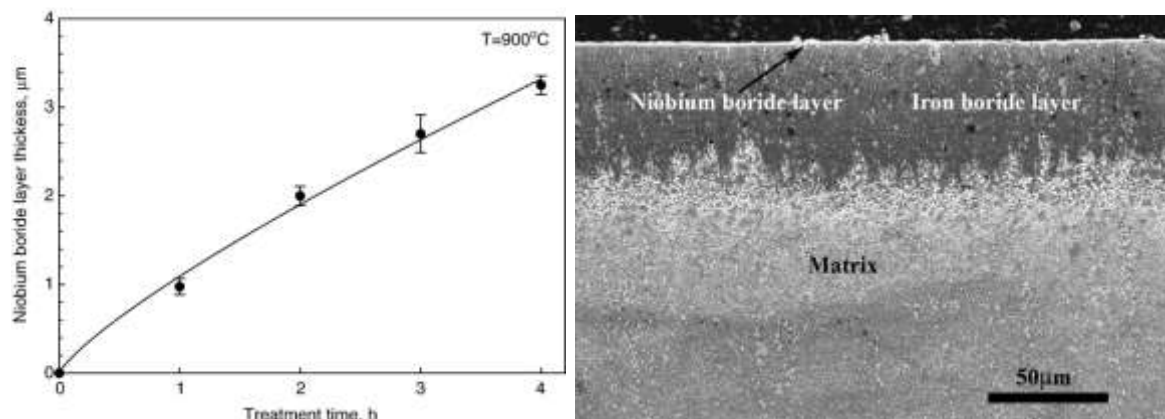


Figura 1.1 Espesor de capa para boruro de Nb sobre un acero M2 e imagen MEB a 900°C 2h. [14].

Para el desempeño de un acero herramienta durante el corte, Hacisalihoglu, Yildiz y Alsaran [15] consideran que el problema común es el desgaste del flanco de corte y su adhesión de material de trabajo a la herramienta durante las operaciones de mecanizado. Los autores realizan tratamientos superficiales simplex y dúplex que combinan un proceso

de difusión y un revestimiento cerámico de película delgada. En este estudio, fueron depositados varios recubrimientos a base de nitruro (TiN, TiCN, AlTiN and CrN) sobre el sustrato (acero herramienta AISI M2) por la técnica de deposición física de vapor por arco catódico (CAPVD). El tratamiento de nitruración con plasma se realizó en una mezcla de 50% N₂-50% H₂gas a 500°C durante 2 h. Se investigó la morfología superficial del acero AISI M2, mediante microscopia electrónica de barrido, ensayos de microdureza, difractor de rayos X y profilometro óptico. Las propiedades tribológicas se evaluaron como pruebas de desgaste con bola de Al₂O₃. Las superficies recubiertas con TiN y TiCN mejoraron la resistencia al desgaste. Se muestra en la Figura 1.2 una sección del recubrimiento de nitruración de titanio, que condujo a una capa compacta, uniforme de 10 µm de espesor.

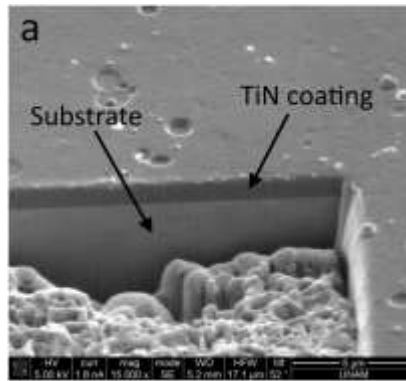


Figura 1.2 Imagen MEB de la sección transversal del espécimen con recubrimiento TiN
[15]

En general, el tratamiento dúplex obtuvo un menor desgaste debido a la baja adhesión de la capa de compuesto y revestimiento de pequeñas películas. En la presente tesis, se usa TRD de NbC-VC sobre inserto de acero M2 y se propone realizar mecanizados y evaluar el rendimiento de la herramienta corte.

1.1.1 Antecedentes nacionales

Castillejo Nieto retoma fundamentos de la técnica de deposición por difusión termoreactiva (TRD)[1] y presenta compendios del proceso en recubrimientos de carburos de vanadio y carburos de niobio sobre el sustrato acero H13 de forma económica con esta técnica. La. Se evalúan los revestimientos de NbC y VC con una mezcla de bórax, aluminio y ferroelementos a temperaturas de 1020°C por cuatro horas. Se identificaron sus fases por difracción de rayos X (DRX) y se observó su morfología y espesor de la capa por microscopia MEB. La microdureza en los recubrimientos se evaluó en la sección transversal y estuvo entre 2180.5 Hk para el carburo de niobio y 2197,9 Hk para el carburo de vanadio.[16]. Con la técnica TRD, también se han realizado recubrimientos sobre aceros herramientas, al variar parámetros de temperatura y tiempo, para observar el comportamiento de capa con diferentes elementos de formación de carburos [17],[18],[19],[20].

Los resultados de Castillejo et al. [21] confirmaron la presencia de recubrimientos de NbC, VC, CrC, NbVC con buen espesor ($14.8 \pm 1.5 \mu\text{m}$), mejor resistencia a la corrosión, y disminución de coeficiente de fricción (COF) con valores cercanos de 0,3. Los autores realizaron pruebas de rayado y pin-on-disk para evaluar su tribología. Por medio de polarización potenciodinámica (TAFEL)[16] y espectroscopia de impedancia electroquímica (IES) ejecutaron experimentos de resistencia a la corrosión [22] para los recubrimientos. Los resultados de sus investigaciones, artículos por la técnica TRD obtenidos por Castillejo Nieto [1], fueron base del actual trabajo de tesis para el estudio, de recubrimientos de insertos de carburos depositados por este método con miras a la producción industrial nacional.

Orjuela [23] estudia sustratos H13 y D2 para recubrir NbC y VC y utilizó la técnica TRD (Deposición por difusión termoreactiva). En las muestras, varía los porcentajes de elementos de formación de carburos (EFC) de contenido de niobio y vanadio. Analizó la microestructura de los recubrimientos mediante microscopia electrónica de barrido (MEB)

y difracción de rayos X (DRX). La composición química se identificó con las técnicas de espectroscopia de dispersión de energía (EDS), fluorescencia de rayos X (XRF) y espectroscopia de fotoelectrones por rayos X (XPS). Se evidencia en la obtención de recubrimientos por TRD alta porosidad e irregularidad de espesor. En los estudios [24],[25] se evalúa la resistencia de la capa a la corrosión por técnica espectroscopia de impedancia electroquímica (IES) y polarización potenciodinámica (Tafel).

Para combinar dos métodos de recubrimientos Castro Hermosa [26] presentó en su investigación experimental recubrimientos bicapa de $V_xNb_yC_z$ y $Bi_xTi_yO_z$ producidos por el proceso sputtering RF y deposición/difusión termo reactiva (TRD) sobre un sustrato de acero herramienta AISI D2, H13 y M2. El proceso TRD lleva a una mezcla fundida de bórax, aluminio, ferroaleaciones de niobio, vanadio, con temperatura de 1313°K por 3 horas hasta formar la capa. En el método de sputtering RF, las capas depositadas utilizaron una potencia de 150W, temperatura ambiente, presión de trabajo y tiempo de 30 minutos. Se evidenció con la técnica TRD la formación de carburos ternarios de $VNbC_2$, mientras que por la técnica DRX se evidenció una orientación mixta con estructura cristalográfica FCC y la composición de estos elementos se evaluó en la técnica EDS. En los recubrimientos de $Bi_xTi_yO_z$ [27] fueron amorfos con formación de óxido de bismuto. La morfología estructural de los recubrimientos por la técnica de sputtering se estudió por microscopia MEB y microscopia confocal.

Los autores Toro, Marulanda y Olaya [28] y Toro [29] estudiaron el proceso TRD en recubrimientos sobre herramientas de corte y el desempeño en el servicio de herramientas de punzonado con acero AISI D2 y herramientas de roscado con acero M2. Se obtuvieron recubrimientos de NbC a 1050°C por 4 horas. Los resultados muestran mejora en la resistencia al desgaste en comparación con las mismas herramientas sin recubrir. También en algunas investigaciones se ha estudiado la vida útil de herramientas de forjado [30] con tratamientos superficiales sobre materiales herramientas con técnicas de CVD, PVD y TRD. Estos recubrimientos delgados duros dan una alta resistencia al desgaste y la abrasión y la modificación de estos traerá beneficio a la industria.

1.2 Aspectos que intervienen al recubrimiento superficial

Los recubrimientos deben mejorar la resistencia al desgaste, por lo que en el estudio [31] han tratado de mejorar características mecánicas de recubrimientos duros capaces de soportar esfuerzos y choques en materiales tratados, y de asociarse su morfología, con

orientación de fase cristalina, tamaño de grano y rugosidad de su superficie. La composición de la capa superficial en la mayoría de técnicas de deposición de recubrimientos duros consigue un endurecimiento que mejora la resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo, elevando fluencia y resistencia a la oxidación. Se hacen variaciones en la composición química al añadir porcentajes de peso de elementos que logren por difusión formar un recubrimiento superficial con resultado endurecedor. Se han obtenido algunas técnicas para producir recubrimientos de carburos y nitruros. [32], [33]

1.2.1 Composición química del sustrato

De acuerdo con la norma ASTM A600-92^a [34] para especificaciones de aceros herramientas de alta velocidad, en la Figura 1.3 el fabricante debe realizar un análisis de temperatura del acero M2 para determinar el porcentaje de elementos, valores que deben cumplir con los requisitos de composición química expresos.

UNS Designation ^d	Type	Carbon		Manganese		Phosphorus	Sulfur ^c		Silicon		Chromium		Vanadium		Tungsten		Molybdenum		Cobalt	
		min	max	min	max	max	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	
Molybdenum-Type High-Speed Steels																				
T11301	M1	0.78	0.88	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.50	3.50	4.00	1.00	1.35	1.40	2.10	8.20	9.20	
T11302	M2 regular C	0.78	0.88	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	1.75	2.20	5.50	6.75	4.50	5.50	
	high C	0.95	1.05	0.15	0.40	0.03	0.03	0.20	0.45	3.75	4.50	1.75	2.20	5.50	6.75	4.50	5.50	

Figura 1.3 Requerimientos de composición química para acero herramienta M2 por ASTM A600-92^a [34]

El espesor del recubrimiento y el contenido de carbono del sustrato en la matriz tienen relación con la temperatura del tratamiento [18]. En la Figura 1.4 se observa el comportamiento en capas de NbC y VC sobre un acero D2 con hasta 5 horas de tratamiento a diferentes temperaturas. Se muestra un incremento del recubrimiento con aumento de elementos de formación de carburos. Además, presentaron una disposición ascendente entre la temperatura del tratamiento y el aumento del espesor de la capa.

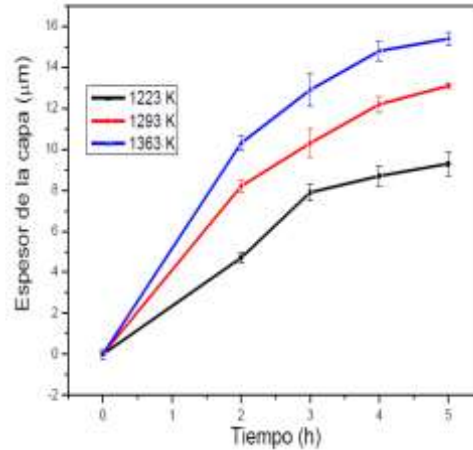


Figura 1.4 Espesor de la capa de Nb-V sobre un sustrato aceros D2 en función de la temperatura y el tiempo por la técnica TRD. [18]

1.2.2 Propiedades mecánicas del sustrato

El sustrato depende de su composición [35] de elementos y aleaciones, que al someter a esfuerzo o tenacidad provee propiedades que apoyan un buen comportamiento, ofrece un gran soporte a la capa al momento que se someta a grandes deformaciones. Los aceros herramientas debe conservar sus propiedades a pesar de alteraciones provocadas por las condiciones de empleo bien sea por calentamiento provocado durante el trabajo, a temperaturas elevadas.

El acero AISI M2 sin tratamiento térmico da un valor de dureza promediado de 335 HV, presenta aleaciones, gran tenacidad y mejor de acabado. Para la presente investigación, se utiliza un acero S600-M2[36], aleado al tungsteno y molibdeno con propiedades mecánicas, como se muestra en la tabla 1-1.

COMPOSICION QUÍMICA ACERO AISI M2 % EN PESO					
C	Cr	Mn	V	W	Mo
0.85	4.15	0.30	1.95	6.40	1.95
PROPIEDADES MECÁNICAS					
Acero M2	Temperatura de temple		Dureza	Resistencia al impacto	Resistencia al desgaste adhesivo
	°C	°F	HRC	(J)	
	1200	2200	65	23	3-4

Tabla 1-1. Propiedades de acero M2.[37]

1.3 Deposición por difusión termoreactiva (TRD)

La técnica enfatiza en la producción de recubrimientos de carburos superficiales sobre aceros que presentan contenido de carbono mayores a 0.3% en varios procesos como los

son en baños de sales, lecho fluidizado o caja de polvos[17]. El método TRD muestra recubrimientos con alta dureza, buena adherencia al acero, alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la corrosión y bajo coeficiente de rozamiento [38]. Este tipo de técnica es sencillo en el proceso de obtener capas de carburos de vanadio, cromo, niobio y tungsteno y consigue recubrimientos duros homogéneos de alta dureza con espesores entre los 3µm y 9µm [39],[2].

La producción de estos recubrimientos inicia por fabricación de crisoles de material inoxidable, van a hornos refractarios industriales de resistencia eléctrica con capacidad de temperaturas mayores a 1050°C, no requiere algún tipo de cámara de vacío y es una técnica de forma económica sin ser agresiva con el medio ambiente [16].

En la técnica TRD, se da una combinación de tratamiento de borizado y endurecimiento superficial con variación en la composición química de cementación del sustrato, a temperaturas mayores a los 1050°C. El contenido de carbono es disuelto en su núcleo y se difunde hacia su superficie permaneciendo activo para combinarse químicamente con las ferroaleaciones (Elementos Formación de Carburos) presentes en el medio para conseguir capas de carburos [31].

El esquema típico de la Figura 1.5 muestra el inicio y fin de la técnica de deposición por difusión termoreactiva. Para el acero herramienta M2 deben precalentarse a temperaturas de 600°, para luego realizar el proceso TRD de mezclas con baños de sales de bórax pentahidratado con la mezcla EFC a una temperatura superior a 1050°C, dependiendo del tiempo tratamiento es el crecimiento del recubrimiento. Luego, se hace un revenido a la muestra recubierta para aliviar tensiones.

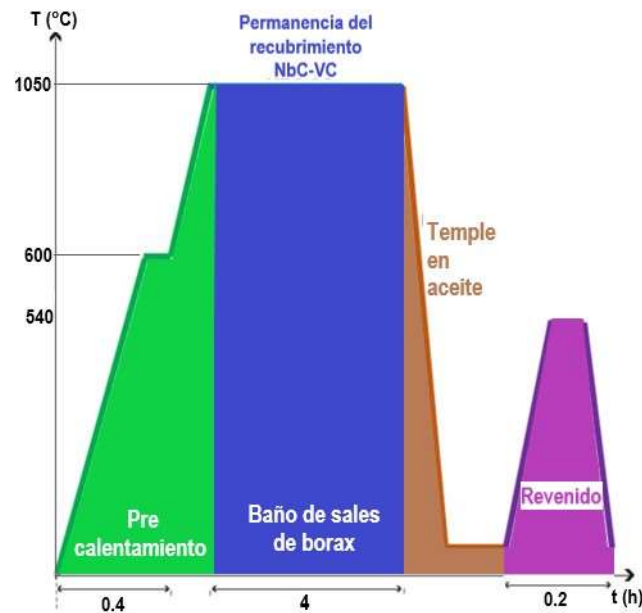


Figura 1.5 Esquema del ciclo típico por la técnica TRD Fuente: Autor

Los pasos para una óptima técnica TRD se muestran en la Figura 1.6 que representa un esquema general para producir recubrimientos duros de carburos por deposición por difusión termoreactiva.

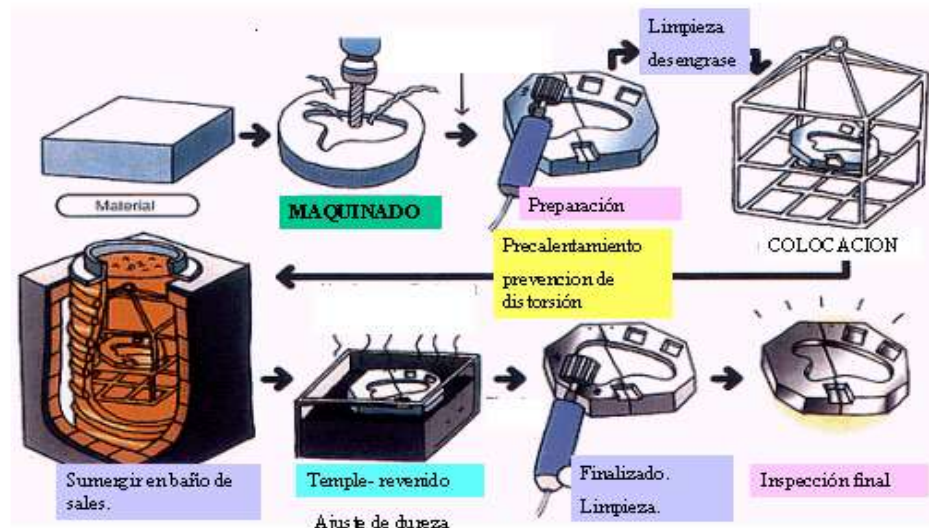


Figura 1.6 Esquema general del proceso de deposición por difusión termoreactiva. [35]

1.3.1 Mecanismo de formación de la capa

La formación del recubrimiento es la combinación química de los elementos de formación de carburos (EFC) al sustrato que contenga un porcentaje de carbono mayor al 0.3%, a una temperatura y tiempo eficiente del recubrimiento al área para obtener capas duras.

Esto sucede cuando las pequeñas energías libres realizan la formación del recubrimiento de EFC unida sobre la superficie del sustrato [40] como se muestra en la Figura 1.7.

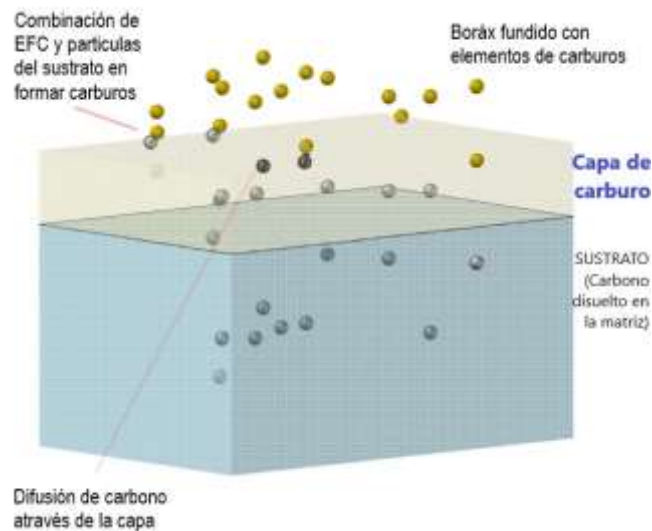


Figura 1.7 Esquema del mecanismo de formación de la capa de carburos por la técnica TRD. Fuente: Autor.

El crecimiento de la capa dependerá de la difusión del carbono, es necesaria una alta temperatura, entre 800°C a 1250°C. Se forman espesores de recubrimientos duros que varían de 3µm a 12 µm, obtenidos desde 1 hora a 4 horas de acuerdo con el porcentaje de carbono del sustrato y temperatura del baño del tratamiento. El acero herramienta con recubrimiento es un nuevo tipo de herramienta donde se alarga la vida útil y mediante los recubrimientos duros, se investiga la actuación del acero herramienta para ser más resistente al desgaste y tener gran tenacidad en herramientas de corte [41].

1.3.2 Tiempo de inmersión

El crecimiento de la capa de carburos sobre aceros de alto porcentaje de carbono depende del tiempo de tratamiento y la temperatura podrían expresarse en la ecuación (1.1). Arrhenius predice la formación del recubrimiento en forma perpendicular de elementos de formación de carburos por temperatura a difusión (reacción química) y velocidad [42],[43]

$$\frac{d^2}{t} = K = K_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1.1)$$

Donde:

d = espesor de la capa (cm)

t = tiempo (s)

K = coeficiente de difusión de los átomos de carbono en el carburo (cm^2/s)

K_0 = constante pre exponencial que es independiente de la temperatura (cm^2/s).

Q = energía de activación (167,47 – 209,34 KJ/mol)

T = temperatura absoluta (K)

R = constante de los gases (8,314 J/mol K)

La ecuación (1.1) muestra una relación exponencial entre la tasa de crecimiento del espesor de la capa, la temperatura y el tiempo de tratamiento. Se mostró una relación lineal directa donde la pendiente estará definida por el coeficiente de difusión y por lo tanto, se aumentó en función de la temperatura. La Figura 1.8 muestra la relación entre el tiempo de tratamiento y el espesor de capa logrado en recubrimientos de carburo, de acuerdo con la variación de temperaturas.

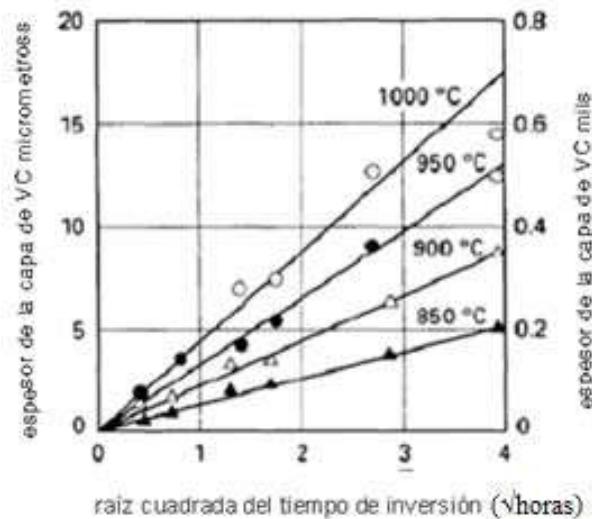


Figura 1.8 Relación entre espesor vs tiempo de tratamiento de carburo de vanadio. [23]

1.3.3 Elementos de formación de carburos

Generalmente, los elementos de metales de transición en la tabla periódica entre los grupos V y VI poseen afinidad química con el carbono y nitrógeno, por lo que ofrecen el efecto endurecedor que investigamos. La producción de estos elementos tiende a la

formación de carburos, nitruros y carbunitruros. En este trabajo de tesis, fueron utilizados los elementos de formación de carburos (EFC) de carburo de vanadio (VC) y carburo de niobio (NbC).

1.3.4 Elemento endurecedor ferroniobio

Estos elementos están compuestos entre el niobio (Nb) y el Hierro (Fe). Esta ferroaleación muestra un color gris brillante y pertenece a elementos químicos del bloque D de metales de transición. Posee buena ductilidad, alta densidad, es resistente a la corrosión y un magnifico conductor térmico y eléctrico. Gracias a sus excepcionales propiedades en la actualidad se emplea en la manufactura de componentes de aleaciones resistentes en el sector metalúrgico [44]. El proceso de producción de niobio en empresas que extraen *pyrochlore*, como se muestra en la Figura 1.9, convierte las unidades de óxido de niobio en HSLA [45] y en ferro-niobio a través de procesos de reducción aluminotérmica o reducción en arco eléctrico. El niobio se emplea principalmente como elemento de micro aleación en acero, ya que forma una mayor resistencia y dureza al mismo tiempo. Hay piezas importantes de la industria que emplean acero micro aleado como la automovilística, los gasoductos, oleoductos y aplicaciones industriales como en la Compañía Brasileña de Metalurgia en Mineracao (CBMM).



Figura 1.9 Ferro-niobio-Pyrochlore concentrado de la mina Niobe, en Canadá. Los cuadrados visibles son en papel de 2 mm de tamaño [45].

Contenido de ferro-niobio ACOMET	
Elemento	Porcentaje –contenido
Nb	63% min.
Al	0,75% Max.
P	0,20% Max.
C	0,15% Max.
S	0,10% Max.
Si	0,08% Max.

Tabla 1-2. Composición química del ferro-niobio en la empresa ACOMET[46]

1.3.5 Elemento endurecedor ferro-vanadio

La morfología del vanadio (Figura 1.10) es la de un elemento duro con aleación y con buenas características de resistencia mecánica por su dureza. El ferrovanadio está compuesto al 78% de vanadio y hierro con un buen aleante en la fabricación de aceros, gran uso en los HSLA (High Strength low alloy Steel, aceros rápidos (HSS) y aceros herramientas. En la Tabla1.3, se conoce el contenido típico del ferro-vanadio, según ACOMET [47].

Contenido de ferro-vanadio ACOMET	
Elemento	Porcentaje –contenido
V	78% min.
C	0,25% Max.
Si	1,50% Max.
Si	1,50% Max.
Al	2,00% Max.
P	0,08% Max.
S	0,05% Max.

Tabla 1-3. Composición química del ferro-vanadio de la empresa ACOMET [47]



Figura 1.10 Ferro-vanadio. Fuente: ACOMET. [47]

1.4 Mecanismos de desgaste

Empresas de producción industrial y metalmecánica han presentado en máquinas y equipos una avería y deterioro en la superficie de piezas y materiales debido al uso constante y condiciones que producen desgaste[48]. La pérdida de material en la pieza evidencia el desgaste y cambia su medida inicial, mostrando asperezas, partículas y cambiando su tolerancia específica al producir un daño irreversible ocasionado al medio y por los fenómenos mecánicos y químicos [49]. Son mecanismos de desgaste: la acumulación de material removido de una superficie a la otra (Figura 1.11.a), es decir, adhesivo; la remoción de partículas (Figura 1.11.b) o desgaste abrasivo; el movimiento repetitivo (Figura 1.11.c) o fatiga; y el deterioro por sustancia (Figura 1.11.d) o desgaste triboquímico [50].

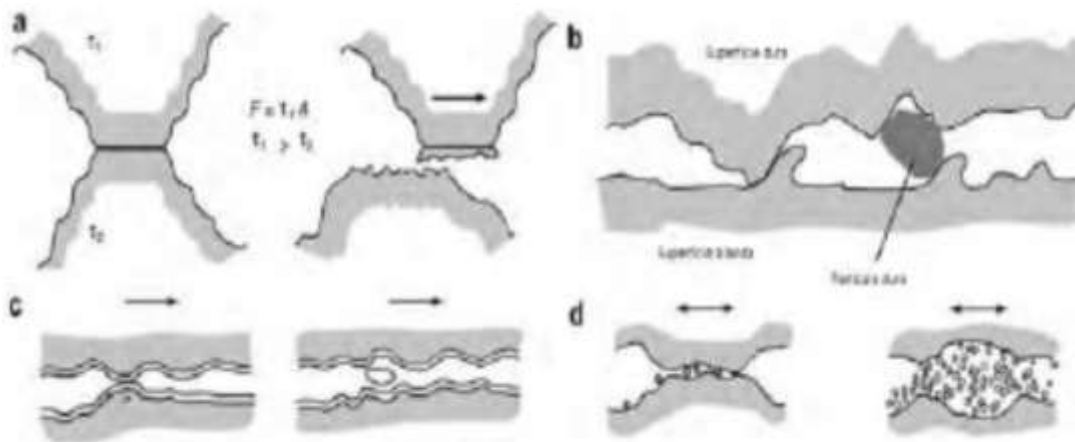


Figura 1.11 Mecanismos de desgaste: a) adhesivo, b) abrasivo, c) fatiga y d) químico. [50]

1.4.1 Desgaste adhesivo

Este tipo de desgaste ocurre al contacto de dos superficies que se adhieren hasta el punto de fusión entre ellas, formándose una sola. Se empiezan a liberar fragmentos, partículas entre las dos superficies como se describe en la Figura 1.11.a. En diminutas proporciones del área de contacto entre dos cuerpos hay desprendimientos, que dependen de la fuerza aplicada, y formación de asperezas. Este desgaste se produce por uniones adhesivas que

dependen del medio y propiedad del material de contacto, por poca lubricación y contaminación de la zona [51].

El desgaste severo por este mecanismo se puede presentar en la cadena cinemática de una máquina o equipo siempre y cuando no haya presencia de lubricación adecuada en las dos superficies de contacto. Empieza el deterioro en la superficie de dureza baja, partes del material se deslizan en las superficies, siendo adherido y eliminando partículas al propagar el desgaste [52].

1.4.2 Desgaste abrasivo

Este tipo de desgaste se debe a la acción de partículas que puede ser causada por la abrasión de partículas metálicas. De acuerdo con la norma G40-17 del ASTM [53], el desgaste abrasivo se finiquita con la interacción de partículas y la pérdida de masa resultante que son forzadas en la superficie, trasladándose de un lado a otro. El desgaste abrasivo involucra el tipo de material, composición química, microestructura y es una de las principales causas de daños en máquinas, elementos, equipos del sector industrial, metalmecánico, minero, agroindustrial, entre otras.

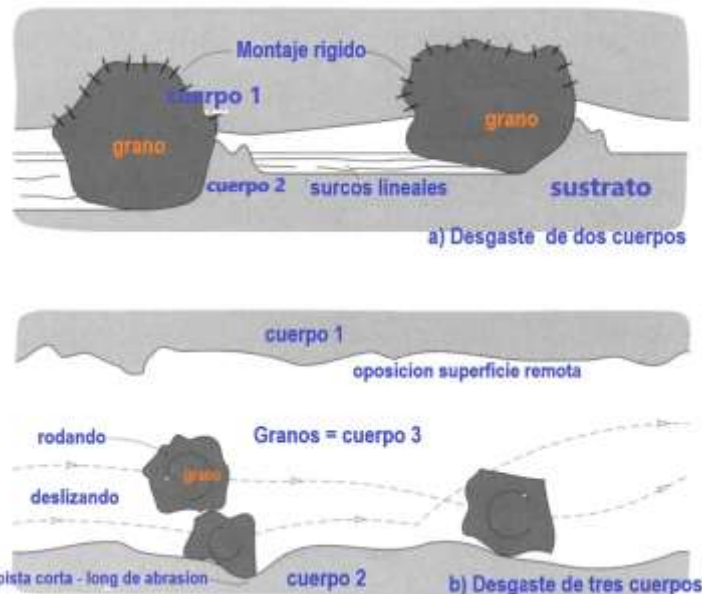


Figura 1.12 Formación de desgaste abrasivo: a) de dos cuerpos y b) de tres cuerpos. [54]

En la Figura 1.12a, se muestra la formación de desgaste [54] abrasivo de dos cuerpos es decir, cuando es causado por rugosidades duras propias de una de las superficies de contacto. En la Figura 1.12b, el desgaste abrasivo de tres cuerpos presenta una partícula

abrasiva de mayor dureza que los materiales en contacto, la cual se muestra como elemento adicional entre los cuerpos en contacto.

1.4.3 Tipos de desgaste en herramienta de corte

El desgaste es generalmente indeseable, como se puede ver en una herramienta de corte, ya que provoca un cambio no deseado en la geometría. Las principales herramientas de desgaste pueden clasificarse en las principales como se muestra en la Figura 1.13.

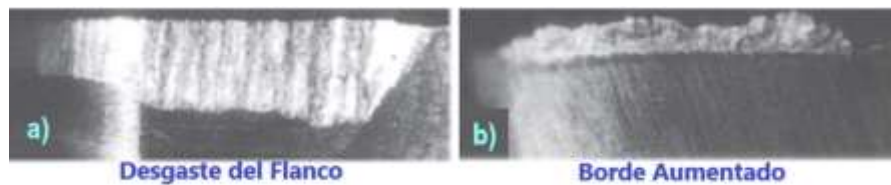


Figura 1.13 Tipos de desgaste en herramientas de corte: a) Desgaste en el flanco de un inserto herramienta de corte y b) borde aumentado por material de trabajo mecanizado. [55]

Se realiza un movimiento relativo entre dos cuerpos que están bajo una carga normal. Los fragmentos de material más blando se adhieren a la herramienta de corte más dura. Este material adherido es inestable y se desprende en pequeños fragmentos de la herramienta de corte, tal como se observa en la Figura 1.13.a. Se muestra también un borde aumentado en corte de metal que generalmente se produce a bajas velocidades en la Figura 1.13.b. Dependiendo del tamaño y la estabilidad del borde, las fuerzas disminuyen porque el ángulo de desprendimiento efectivo se convierte en positivo o el borde aumentado agrupado desafila la herramienta de corte e incrementa las fuerzas [55].



Figura 1.14 Esquema de partículas en desgaste abrasivo de una herramienta de corte durante el desprendimiento de viruta. [56]

La herramienta de acero rápido de alta velocidad (HSS) con presencia de material a mecanizar tiene partículas más duras que la matriz martensítica de la herramienta (Figura 1.14). Carburos duros, óxidos y nitruros están presentes en algunos aceros, pero hay poca evidencia experimental que indica que la abrasión por estas partículas no tiene un papel significativo al desgaste en la herramienta. Se evidencia desgaste por abrasión de la herramienta HSS en la superficie del filo y flanco por TiCN. Se ven partículas en secciones a través de herramientas utilizadas para maquinado de acero inoxidable austenítico, como se muestra en la Figura 1.15. [56]

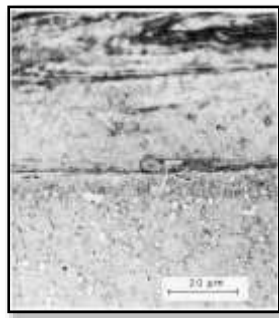


Figura 1.15 Sección de la cara de filo de una herramienta HSS después del corte de material de trabajo acero inoxidable, al observar su acción abrasiva por partículas de TiCN. [57]

- **Desgaste del flanco :**

El principal factor que representa este desgaste es la fricción del filo de corte con el maquinado de fresado frontal, lo cual produce desgaste por abrasión-adhesión y depende de los parámetros de corte, su temperatura y profundidad de corte. La Figura 1.16 muestra tres tipos de desgaste al flanco, lo que genera características del proceso de maquinado y varía la vida útil de la herramienta de corte. Los esquemas que se muestran son: a) desgaste de nariz , b) desgaste de la cara del filo de corte y c) área o zona de desgaste del filo, de acuerdo con las condiciones de corte profundidad, velocidad y avance de la mesa [57].

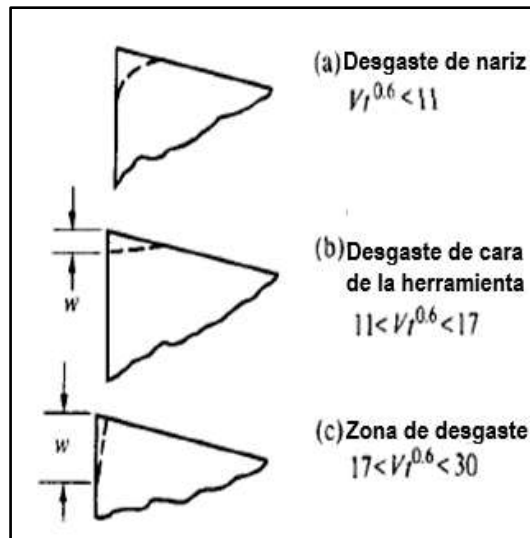


Figura 1.16 Desgaste en la herramienta de corte: a) nariz, b) de la cara de corte y c) área desgastada [58].

1.5 Mecanizado de corte por fresadora

Como se muestra en la Figura 1.17, el centro de mecanizado vertical Fadal VMC15 realiza operaciones de fresado, taladrado, y roscado. La operación de fresado es un proceso de corte intermitente a usar uno o más dientes. En el corte por fresado frontal, se mantiene un husillo en rotación mientras la pieza de trabajo está sujeta en una prensa a la mesa de trabajo y se mueve linealmente hacia el cortador. La Figura 1.18 muestra la operación de fresado planear y varios cortes por cada diente de fresado, por lo tanto, se remonta a una trayectoria trocoidal [55] y varía la frecuencia con espesores periódicos de arranque de viruta a cada diente pasando por su intervalo.



Figura 1.17 Máquina de Fresado CNC Marca Fadal VMC 15. Fuente: Unincca laboratorios.

En la Figura 1.19, se muestra varias operaciones de fresado. Al considerar la geometría de la pieza a trabajar, diferentes máquinas y cortes de fresado son usados. Los principales procesos de mecanizado son en arranque de viruta al fresado planear, por ranura y escalonado[55]. Pero también se presentan otros procesos de fresas para taladrado, roscado, rotulado, biselado, chavetero, cola de milano, ranuras en T o sierra.



Figura 1.18 Operación de fresado frontal y diferentes herramientas de corte para fresado. Fuente: Sandvik. [59]



Figura 1.19 Varias operaciones de fresado: planear, ranurado y escalonado. [55]

En el proceso de fresado se debe tener en cuenta el sentido de corte de la herramienta en cómo se forma el desprendimiento de viruta. El fresado periférico es un método de mecanizado en la superficie por corte en dientes en la tangente de una fresa con sentido de corte concordante y sentido de corte en oposición.[58]

El fresado en oposición es opuesto a la rotación de giro de la herramienta de corte (fresa), por lo que aumenta su temperatura debido a su fricción en el filo de corte. Este tipo de mecanizado es recomendado debido a que la viruta va de espesa a delgada, como se muestra en la Figura 1.20.b. La imagen 1.20.a corresponde al fresado en concordancia, donde la herramienta de corte avanza a favor del sentido de avance de la mesa. El espesor de viruta desde el principio de corte hasta el final decrece gradualmente. Al salir la viruta del corte, incrementará su temperatura por la provocación de cargas de tracción, por lo que pueden ocurrir fallos como fisuras, fracturas y desgaste en el flanco [59].

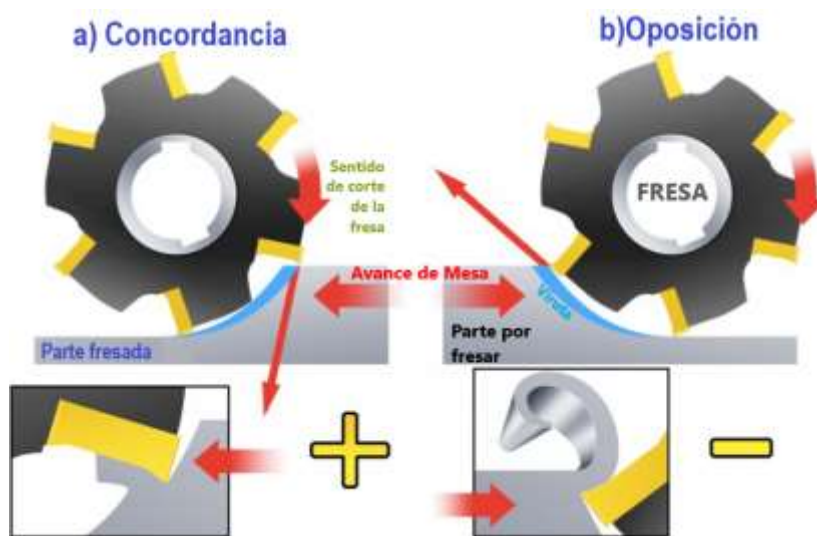


Figura 1.20 Sentidos de corte de la operación de fresado: a) concordancia b) oposición. [61]

1.5.1 Tipos de desgaste de inserto

El mejoramiento en la resistencia al desgaste y la abrasión son los principales efectos que se han visto en común. En un progreso, se han desarrollado capas duras delgadas que han logrado un gran avance entre recubrimientos de CVD,PVD y TRD al depositar capas finas de 2 a 5 μm de carburos y nitruros, como TiC, VC, NbC o TiN, realizados en materiales herramientas, las cuales ofrecen una gran excelencia en la resistencia al desgaste [30].

En la dirección del corte en herramientas de corte en carburo, se proporciona una capa delgada de TiC, aplicado por deposición química de Vapor (CVD), con espesor cerca a los 0.005 mm. Estos recubrimientos reducen la tendencia a agrietarse cuando se está maquinando un acero blando y permiten mecanizar aceros de baja aleación, a valores altos de temperatura.[57]

Estos procesos aplicados presentan cambio, de manera que las herramientas de carburo son desgastadas o cambia su forma y su corte no es eficiente. Las condiciones de mecanizado presentan tipos de fallas en las herramientas de corte, como se muestra en la Figura 1.21 con la condición y grado de corte en HSS (acero rápido de alta velocidad).



Figura 1.21 Mecanismos de desgaste en herramienta de corte en HSS.[60]

Generalmente, las herramientas de corte presentan fallas principalmente, como se evidencia en la Figura 1.22: **1)** esfuerzo cortante plástico a alta temperatura, deterioro en la precisión dimensional de la herramienta; **2)** deformación bajo tensión y compresión por incremento de fuerza de corte y deformación de rebabas, **3)** difusión, depende de la temperatura, con cambios a altas velocidades de corte limitando el avance de remoción del metal que puede ser alcanzado; **4)** desgaste por deserción, no depende de la temperatura y es el más destructivo en las herramientas a rangos de velocidades de corte bajas; **5)** falla por abrasión, donde el desgaste es debido al incremento de la fuerza de corte y deterioro de la superficie final del material de trabajo; y **6)** desgaste por deslizamiento, que puede ser importante en las herramientas de acero y ocurre a algunas posiciones en la herramienta. Con la acumulación de material maquinado al borde de la

herramienta de corte (build up edge) estas son más sensibles a fallar por fractura y la fatiga térmica puede causar agrietamiento que acorta la vida útil de la herramienta.[60]

Esta investigación permite observar el comportamiento de los recubrimientos de carburos de niobio (NbC) y vanadio (VC) por la técnica TRD a insertos de corte fabricados y así observar qué tipo de desgaste presentará luego de maquinar un acero de trabajo de 0.4% y 0.1% de Carbono.



Figura 1.22 Tipos de fallas en herramientas de corte en diferentes condiciones de corte: 1) esfuerzo plástico, 2) deformación, 3) desgaste por difusión, (cráter), 4) desgaste por deserción (astillado), 5) desgaste abrasivo y 6) deslizamiento (desgaste en la nariz).[61]

1.6 Técnicas experimentales de caracterización

1.6.1 Difracción de rayos X (DRX)

El objetivo de la técnica de difracción de rayos X es determinar la estructura cristalina de un material. Se emplean rayos X cuya longitud de onda es el orden del espaciamiento interatómico, para facilitar información de las fases presentes e identificar los esfuerzos (tensión, compresión) y el tamaño del cristalito.[1][62] El principio físico de esta técnica es

la Ley de Bragg. El haz incidente, el normal al plano reflectante y el haz difractado son siempre coplanares. El ángulo entre el haz refractado y el haz transmitido es siempre 2θ , lo que se conoce como ángulo de difracción, y este ángulo, en el lugar de θ , generalmente es medido experimentalmente [63]. En la Figura 1.23, se considera un haz de rayos X monocromático (una sola longitud de onda), el cual incide en un cristal y se sustituye en los planos de los centros atómicos de dispersión por los planos cristalinicos que actúan como espejos reflejando el haz incidente de rayos X en las trayectorias de las ondas reflejadas por los diferentes planos que están en fase y asumen un reforzamiento del haz o una interferencia constructiva.[64]

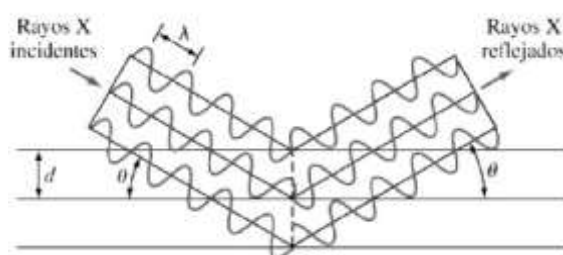


Figura 1.23 Reflexión de un haz de rayos X incidente por los planos (hkl) en ángulo Bragg θ y rayos reflejados que están en fase y se refuerzan entre ellos.[64]

- **Identificación de fases**

Las muestras son piezas que se encuentran en estado puro o formando parte de una mezcla de sustancias, donde cada sustancia produce siempre un patrón de difracción característico[65]. El análisis químico es el principio básico por métodos de difracción y se realiza de forma cualitativa, identificando qué sustancias corresponden a los diagramas de difracción, ya que las intensidades de las líneas de difracción de cada fase son proporcionadas a la fracción en volumen de esa fase presente en la muestra. La identificación se realiza por comparación con patrones en la muestra en programas como PDF (Power Diffraction File), que contienen información de sesenta mil sustancias entre elementos, aleaciones y compuestos.[42]

- **Tamaño de la partícula o grano**

Para las mediciones microestructurales es el tamaño de grano de metales y aleaciones. Numerosos procedimientos han sido desarrollados para estimar el tamaño, los cuales están regidos según la Norma ASTM E112[66]. El tamaño de

los cristales individuales es menor a $0.1 \mu\text{m}$ (1000 \AA). El término “tamaño de partícula” generalmente es usado, pero el término “tamaño del cristalito” es más preciso.[67]

El ancho del pico de difracción de Bragg depende del tamaño de partícula. Cuando el tamaño de partícula promedio decae por debajo de los 2000 \AA , los picos de difracción se vuelven más anchos y disminuyen en intensidad. Se puede utilizar el ancho del pico de difracción como una medida de las dimensiones promedio de las partículas o granos.[23] La relación cuantitativa se conoce como la fórmula de Scherrer:

$$D = \frac{K\lambda}{(\beta \cos \theta)} \quad (1.2)$$

Donde:

D : espesor o diámetro de la partícula en la dirección perpendicular al plano que origina el pico de difracción.

K : constante de Scherrer perfil de la partícula ($0,8 < K < 1,1$)

β : ancho del pico de difracción a la mitad de la máxima intensidad medido en radianes.

λ : longitud de onda monocromática de la radiación X empleada

La ecuación (1.2) es el método más habitual y sencillo para estimar el tamaño de partículas cristalinas a partir de las anchuras de sus picos de difracción de rayos X, como se muestra en la Figura 1.24. En la anchura integrada definida como el área del pico β , se puede suponer el valor FWHM (anchura del pico a media altura) si no se conoce la contribución instrumental o la anchura integrada, definida como el área del pico dividido por su altura. [68]

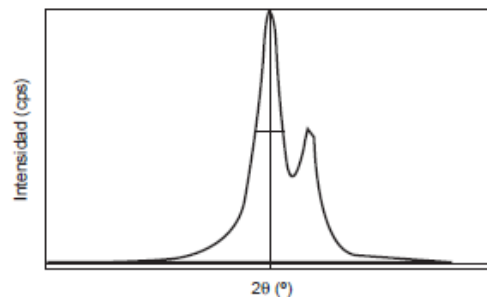


Figura 1.24 Determinación de la intensidad de difracción mediante la anchura de pico a mitad de la altura (FWHM).[68]

Se hace el cálculo con un solo pico de difracción, se elige entre 30° y 50° 2θ , ya que para los ángulos mayores se produce una disminución de intensidad de los picos y el ensanchamiento es mayor, mientras que para ángulos menores la asimetría de los picos puede complicar el análisis (Figura 1.25) [68].

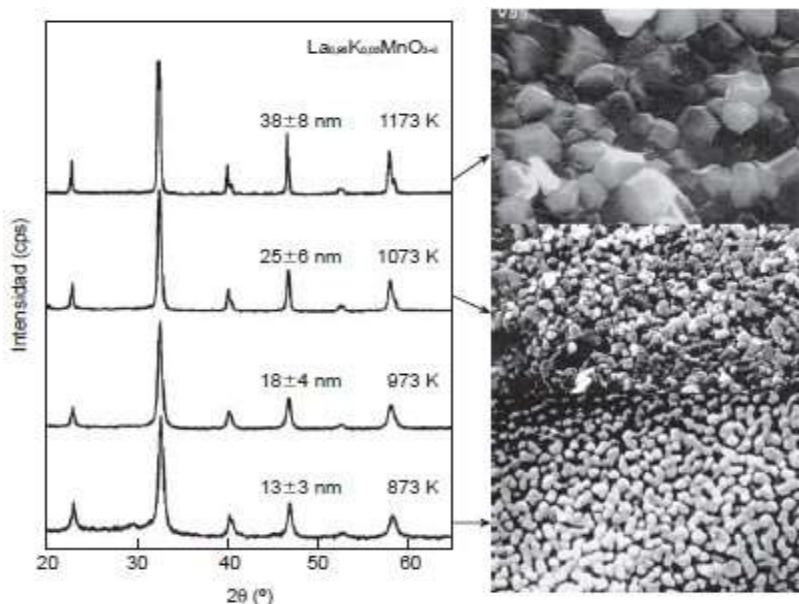


Figura 1.25 Cálculo del tamaño de partícula mediante la ecuación de Scherrer empleando un pico y tamaños por microscopía electrónica MEB.[68]

1.6.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

El equipo de microscopia electrónica de barrido es una técnica cuyo haz es escaneado para barrer la muestra. Se forma a partir de electrones retrodispersados al analizar la morfología de la superficie y electrones secundarios para conocer su composición química de materiales orgánicos e inorgánicos. Principalmente, el MEB se utiliza para investigación de materiales y médico-laboratorios de ciencia-forense.[69]



Figura 1.26 Microscopio MEB ProX - Caracterización de recubrimientos de insertos. Fuente: Universidad ECCI 2018. [70],[71]

La fuente de los electrones utilizados para el microscopio electrónico de barrido puede ser de filamentos de tungsteno o emisor Schottky o una punta de emisión en el campo de tungsteno, debido a la máxima aceleración de voltaje (típicamente 30Kv) [69]. En la Figura 1.27, la muestra es irradiada por tipos de haz de electrones retrodispersados y electrones secundarios emitidos, ofreciendo una imagen efectiva de la morfología superficial del espécimen. Otros fenómenos de diferentes técnicas pueden surgir, por ejemplo espectroscopia de electrones Auger (AES) Espectroscopia de energía Dispersiva (EDS) o Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS), [72],[73].

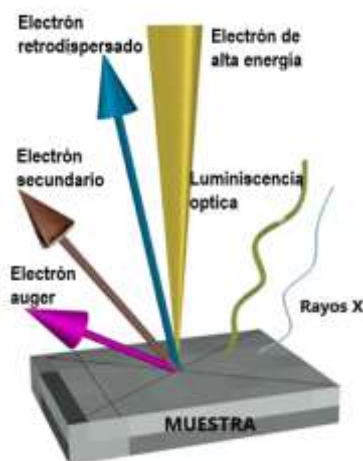


Figura 1.27 Interacción del haz de electrones con el espécimen o muestra. Fuente: Autor

1.7 Microscopia óptica

Un microscopio compuesto es un instrumento óptico que permite observar muestras que son demasiadas pequeñas, amplía su imagen al proyectarse a la vista de la persona o dispositivo de imágenes. Esta ampliación de la muestra, se logra con una lente de aumento simple, al usar un sistema de dos lentes y un lente llamado objetivo que produce una imagen ampliada y real. La Figura 1.28 muestra las partes principales de un microscopio compuesto.[74],[75]

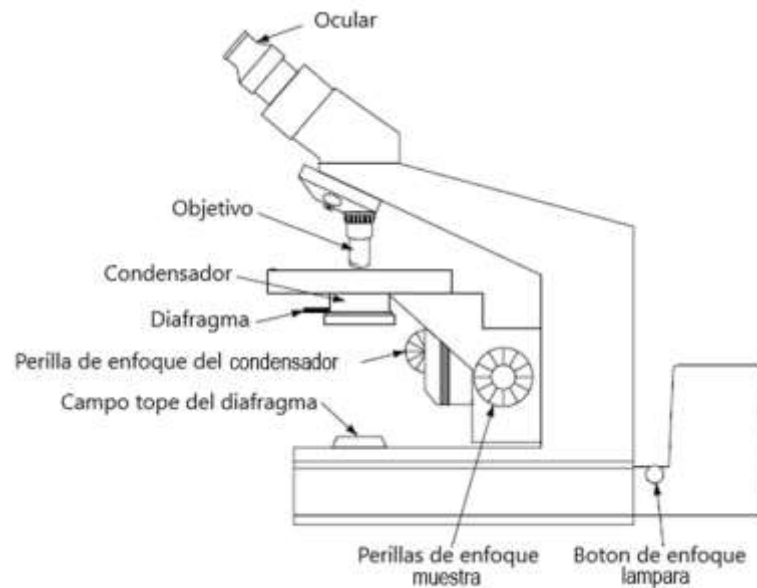


Figura 1.28 Microscopio Óptico Compuesto – partes principales [74].

1.8 Microdureza

Por medio de un indentador de pirámide de diamante, se puede medir la dureza del material en un área reducida para hallar la resistencia de sus propiedades mecánicas. La microdureza Vickers HV es evaluada en mediciones de la carga aplicada, con el tiempo de permanencia de un indentador piramidal con Angulo de 136° , el área de la superficie, longitud de las dos diagonales que la proyecta cómo se presenta en la Figura 1.29 [76].

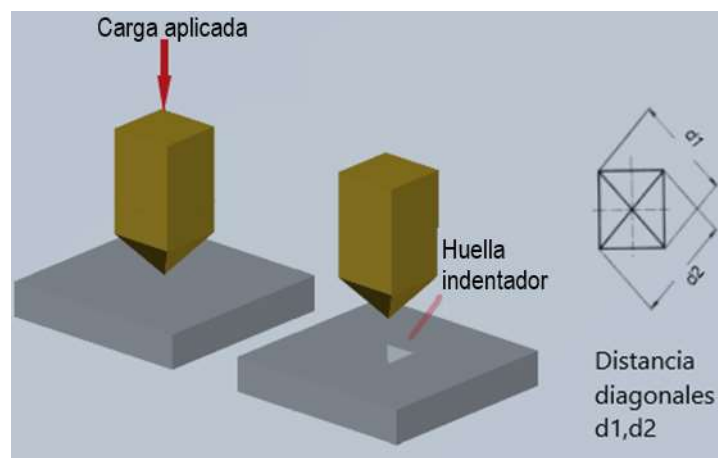


Figura 1.29 Esquema medición microdureza Vickers.[76]

El cálculo de microindentación Vickers HV de la ecuación (1.3) se realiza de acuerdo con la norma ASTM E92 de la Asociación americana de ensayos de materiales.[77]. Allí se determina que F es la carga aplicada a la muestra sobre la superficie en kilogramos-fuerza (kgf) y d_v^2 la medición media de las diagonales de huella de indentación en milímetros (mm), que viene dada por la fórmula:

$$HV = 1.8544 \times \frac{F_{(kgf)}}{d_v^2_{(mm)}} \quad (1.3)$$

1.9 Metalografía de la muestra

El estudio de la metalografía comprende la observación de granos de la morfología estructural de materiales, su composición, su tamaño. Su microestructura es observada a un rango entre $10^{-9}m$ y $10^{-2}m$. Varios análisis identifican, por ejemplo marcas de mecanizado de una pieza, zona de un cordón de soldadura, grietas, fracturas, ralladuras, capas de herramientas de corte por tratamiento. [78]

La metalografía abarca gran parte en la investigación de materiales, aleaciones, nuevas tecnologías, técnicas, por ejemplo una falla en una herramienta de maquinado. Extrae un fragmento, para observar su microestructura, cristalografía y enlace atómico (Figura 1.30), en relación con la microestructura se caracteriza por el tamaño del grano, la forma, cantidad, tipo y orientación de las fases.[79],[66]

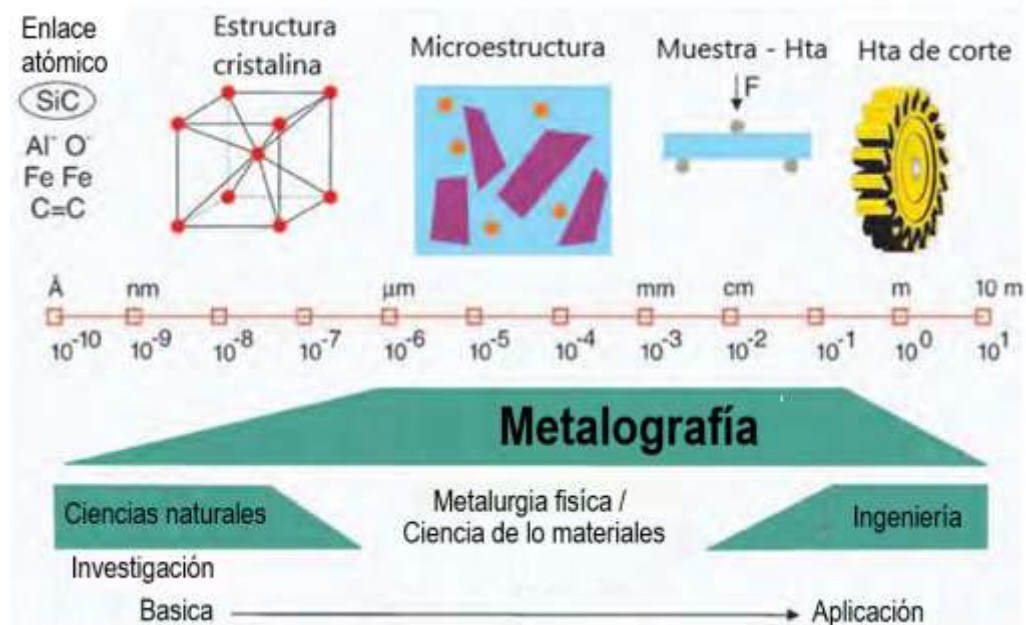


Figura 1.30 Relación de la Metalografía entre la ingeniería a la ciencia. Dimensión m, cm, hasta un átomo \AA . [79]

La preparación del montaje depende de que el tamaño de la muestra tenga planitud, para una mejor observación de su morfología estructural. El montaje de la muestra proporciona una mejor manipulación del lijado, pulido y ataque químico para luego observar su microestructura. En la Figura 1.31 se pautan diferentes tipos de montajes mecánicos, en sujeción de rosca para muestras cuadradas, cilíndricas, utilizadas para metalografía [78],[80],[81].

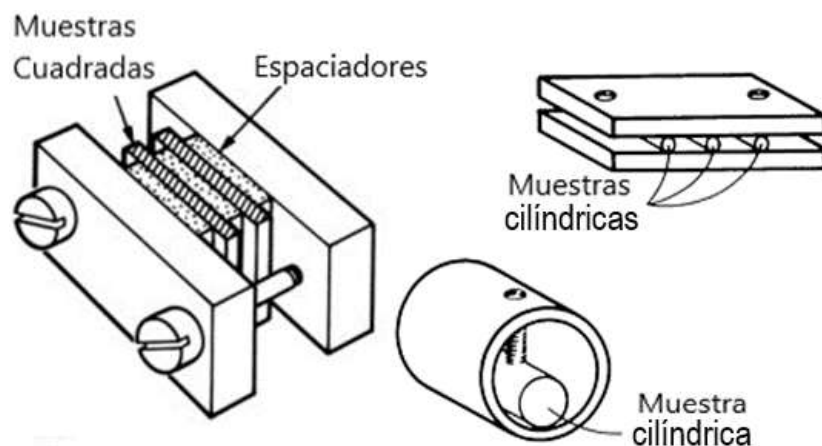


Figura 1.31 Diferentes montajes mecánicos con sujeción de tornillo. [78]

1.10 Caracterización del mecanizado

1.10.1 Fresado planear con insertos de corte

El fresado utiliza una portaherramienta rotativa de múltiples filos de corte para el mecanizado de superficies planas, generalmente dotada de insertos indexables o cuchillas insertadas. Los insertos indexables son utilizados como filos de corte para la herramienta o portaherramientas de cortadores de fresadora, como se muestra en la Figura 1.32. que ilustra la geometría de la nomenclatura por fresado frontal de insertos intercambiables [82].

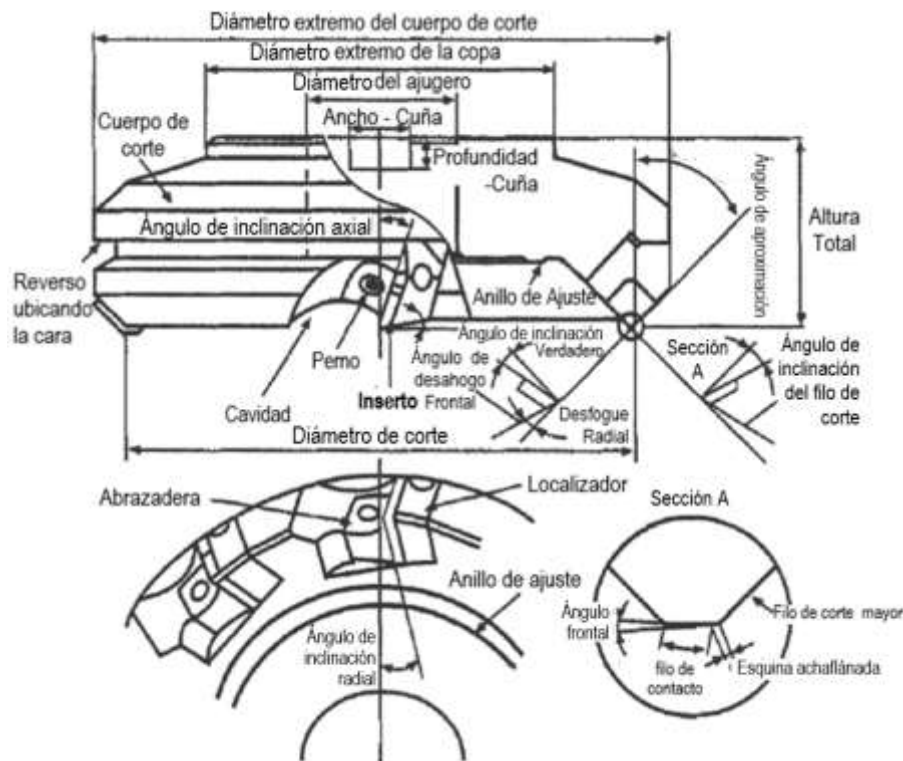


Figura 1.32 Nomenclatura de corte por fresado.[82]

Las esquinas de los insertos pueden ser con radio, chaflán, doble chaflán o planos con diferentes métodos para la sujeción en el maquinado a altas velocidades de corte debido a la fuerza centrífuga de los componentes de sujeción, a) insertos de cavidades no ajustables, b) inserto de cavidad ajustable de diseño radial, y c) calza soldada. El inserto con cavidades fijas con un solo tornillo proporciona un bloque seguro y preciso contra el movimiento, así como un buen soporte de fuerzas de corte. La Figura 1.33 muestra la

sujeción, geometría de un inserto y ángulos de inclinación para el mecanizado por fresado frontal.

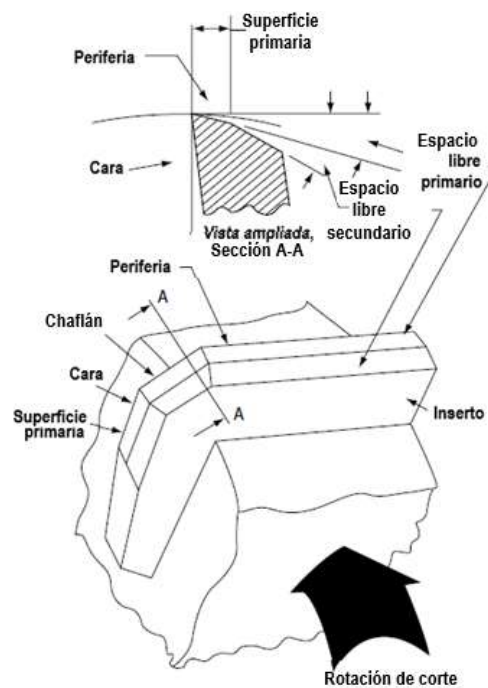


Figura 1.33 Nomenclatura y geometría de un inserto de corte.[82]

1.10.2 Evaluación de desgaste

El proceso de la herramienta de corte en fresado o torneado varía según los materiales de los insertos (recubiertos, no recubiertos, cerámicos), los parámetros de mecanizado y materiales de trabajo al mecanizar. Diversas investigaciones examinan el comportamiento del desgaste, efectos, mecanismos e influencias del filo de corte [83],[84],[85],[86]. Los procedimientos de experimentos implican en el fresado la velocidad del husillo, velocidad de avance, el tiempo y la profundidad del mecanizado necesaria para obtener un valor detallado del flanco de la herramienta de corte [87],[88]. La norma ISO 8688 especifica los procedimientos recomendados para las pruebas de vida útil de diferentes herramientas [89].

La vida de la herramienta de corte fue establecida como el desgaste del flanco (VB) del inserto. La Figura 1.34 muestra el diagrama esquemático del desgaste del flanco de una herramienta de corte [90] y se expresa en la ecuación (1.4):

$$VB = \frac{w}{1 - \tan \gamma_0 \tan \alpha_0} \quad (1.4)$$

Dónde: α_0 es el ángulo del flanco de la herramienta de corte. Ya que $\tan \gamma_0 \tan \alpha_0$ son valores bajos, **W** es el desgaste y **VB** es el desgaste medio del flanco.[90]

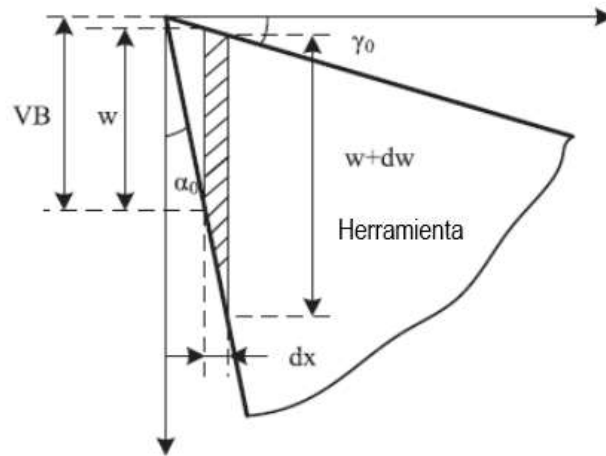


Figura 1.34 Diagrama esquemático del desgaste del flanco de una herramienta de corte.[90]

Para determinar la vida de la herramienta e incrementar la fiabilidad y comparabilidad de pruebas, es necesario la observación del desgaste del flanco luego del fresado final en una herramienta de corte, de manera que esta alcance un tiempo efectivo al corte, tipo de ancho del flanco y su desgaste. La Figura 1.35 muestra un inserto de carburo de fresado planear, de acuerdo con la norma ISO 8688 [91],[89]. Se recomiendan los criterios de vida útil para un inserto de carburo cuando se esté fresando un acero de bajo carbono (operaciones de corte normales). La Figura 1.35.a muestra el desgaste uniforme del flanco (filo de corte mayor) ($VB1=0.35$ mm), la Figura 1.35.b muestra el desgaste no uniforme del flanco (filo de corte mayor) ($VB2 = 1.2$ mm) y la Figura 1.35.c el desgaste de flanco localizado (filo de corte mayor)($VB3= 1.00$ mm) [92].

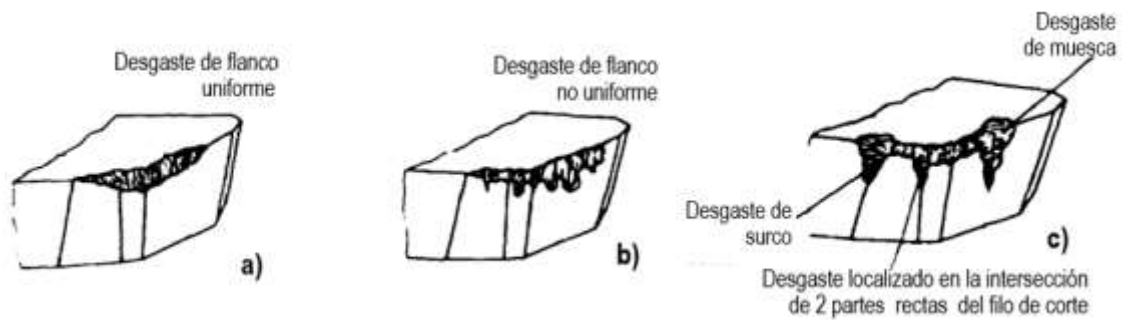


Figura 1.35 Desgaste del flanco de un inserto de carburo en operación de fresado: a) VB1; b) VB2 y c) desgastes localizados VB3. [92]

En 1907 Taylor observa experimentalmente que el desgaste gradual del flanco va aumentando conforme aumenta el tiempo de corte producen mayores niveles de desgaste según se representa en la gráfica de la Figura 1.36, en la cual se distinguen tres zonas diferenciadas. Periodo de rompimiento inicial al entrar en contacto con el material de trabajo se desgasta muy rápido en los primeros minutos de corte. el periodo de desgaste uniforme de acuerdo a una velocidad más o menos uniforme y por último el periodo de aceleración de la velocidad de desgaste marca el principio de región de falla de la herramienta, en el cual la temperatura de corte es más alta y se reduce la eficiencia del mecanizado.[93]

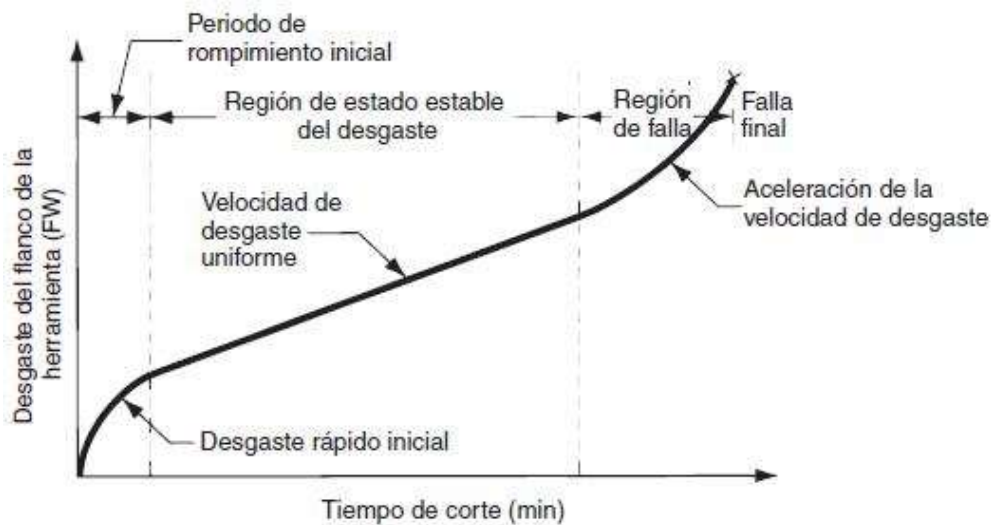


Figura 1.36 Desgaste de herramienta en función del tiempo de corte.[93]

El desgaste del flanco de corte se produce en el filo de la herramienta de corte se atribuye en el roce de la herramienta a lo largo de la superficie mecanizada provocando un desgaste

adhesivo abrasivo a altas temperatura que afectan negativamente las propiedades del material de la herramienta.[94]

El estudio de la vida la herramienta a velocidades de corte sobre el desgastes según el autor Altin [84], cuando mecaniza un a súper aleación Inconel 718 y se muestra en la figura 1.37 los resultados de los experimentos muestran los insertos de corte de tipo redondo (RNGN) se desgastaron más rápidamente que los de tipo cuadrado (SNGN), a bajas velocidades de corte. Esto puede atribuirse a la geometría de la herramienta. Aunque se evidencia que a velocidades de corte mayores a 300 m/min se produce un fallo en la herramienta de corte y acorta su vida útil en el maquinado.

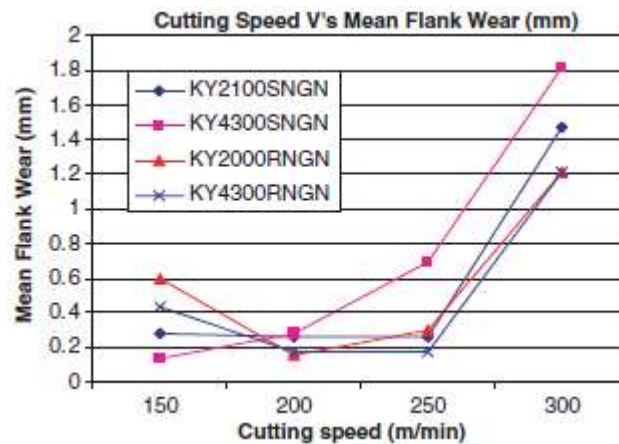


Figura 1.37 Relación entre el desgaste medio del flanco(VBB) y la velocidad de corte de corte (V) maquinando un acero inconel 718.[84]

En la Figura 1.38, se muestra el desgaste de insertos recubiertos por PVD con un material de trabajo de acero para procesos de fresado y procesos de torneado, donde los parámetros de corte varían. Entre los principales parámetros está la velocidad de corte V_c (m/min) que en diferentes pruebas de corte muestra el ancho al desgaste del flanco VB [95].

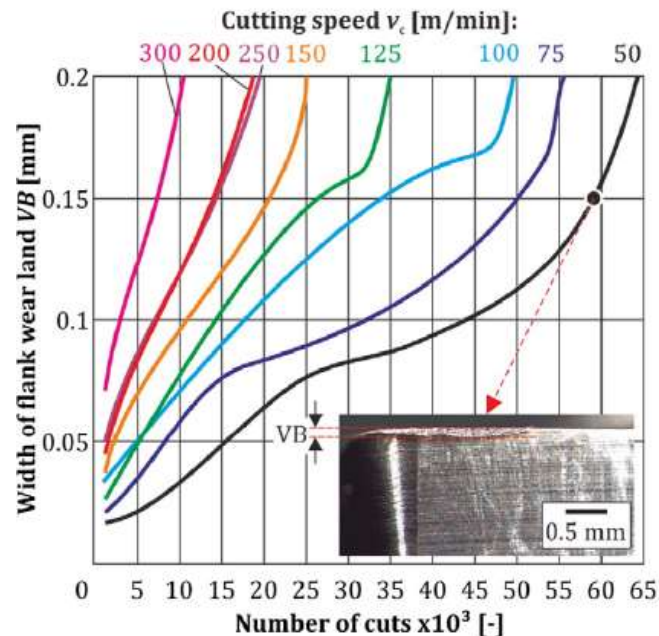


Figura 1.38 Ancho del desgaste del flanco VB versus número de cortes desarrollados en insertos con recubrimiento a varias velocidad de corte V_c . [80]

1.10.3 Medición de herramientas de corte

Para la comprobación de la geometría de las herramientas de corte, varias empresas han hecho máquinas de varias funciones de ejes múltiples, desde la medición de la forma de la herramienta de corte hasta la evaluación de formas de cortes multifacéticos. En situaciones de maquinado, el perfil de la herramienta de corte se convierte en la parte fundamental del mecanizado final [96].

Como dispositivo de ajuste y medición para toda su producción, se utiliza la examinación al filo del flanco del inserto y el software al procesar la imagen utilizada, para la medición de geometrías de herramientas como ejemplo fresas escariadoras, fresas con insertos intercambiables o brocas. Se podrá determinar la longitud y diámetros máximo hasta 0.01 milímetros. La Figura 1.39.a representa una máquina de medición marca Zoller y como ejemplo en la Figura 1.39.b se muestra la medición de un inserto de corte con imagen fotorrealista [7],[97]. Con esta máquina, se inspeccionará la herramienta de corte al

desgaste del flanco, de acuerdo con las condiciones de corte del fresado final luego de maquinar los materiales de trabajo, acero AISI 4140 y AISI 1045.

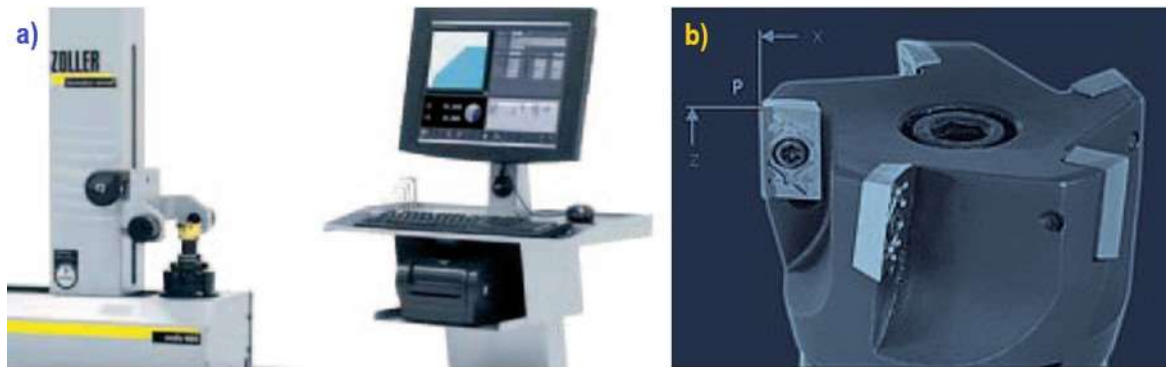


Figura 1.39. Medición del inserto: a) máquina de medición de herramienta de corte y b) medición de un inserto de fresado. [85], [86]

1.10.4 Parámetros de corte de fresado

La operación de fresado de máquinas herramientas está directamente relacionada con el tipo de mecanizado, la cantidad de pasadas que se realizan en el proceso deseado a la pieza a trabajar y las principales condiciones o parámetros de corte, que se complementan en las siguientes definiciones.

Velocidad de Corte

Esta variable se define como la velocidad lineal del área que recorre el desprendimiento de viruta durante el maquinado de la herramienta de corte. La velocidad de corte depende de variables como el ángulo de corte, que es bajo ya que las fuerzas de corte son altas y la pieza de trabajo está en contacto con la herramienta de corte durante un periodo de tiempo relativamente largo. Estas condiciones fomentan la acumulación de viruta al filo de la herramienta, lo que conduce a desgarramientos y desgaste dependiendo del material de trabajo, como se muestra en la Figura 1.40.a [96]. En las pruebas con velocidad de corte en fresado y utilización de insertos por PCD, se observa un grado de desgaste detectado en acumulación de viruta en la cara del filo de corte (Figura 1.40.b). [98]

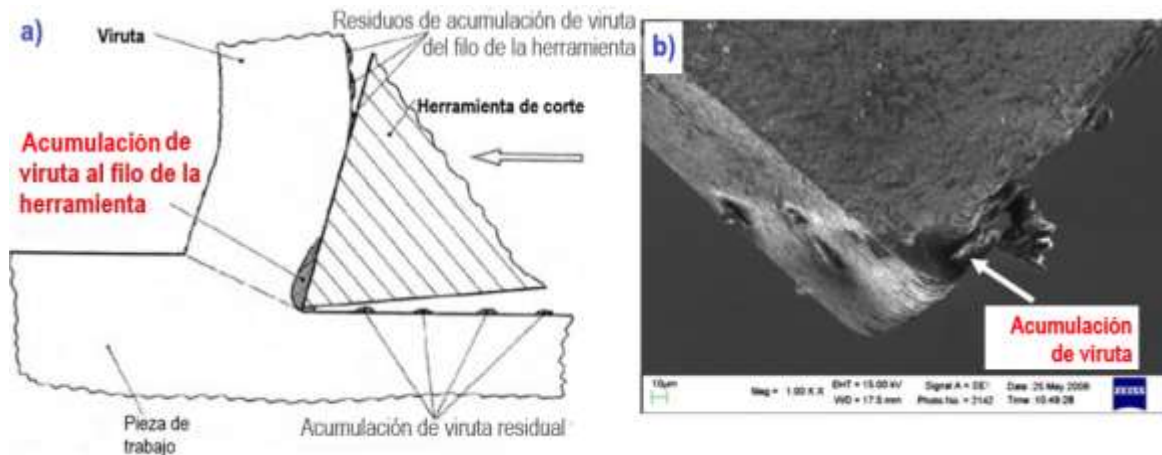


Figura 1.40 Desgaste por acumulación de material: a) Micrografía de la acumulación de viruta en el filo de la herramienta de corte y b) desgaste de un inserto PCD, debido a la transferencia de material de la pieza de trabajo.[98]

La influencia de la **velocidad de corte**, como en el avance de la mesa, profundidad de corte y varios aspectos del mecanizado (temperatura, rugosidad, fuerzas del corte y efectos en la forma de la viruta al material de trabajo), se presenta durante el fresado [99],[100]. La Figura 1.41 muestra el proceso de fresado con velocidad de corte V_c expresada en metros /minuto (m/min). Se calcula a partir del diámetro de la fresa (D) y el número de revoluciones del husillo (n), como se muestra en la ecuación (1.5):

$$V_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \quad (1.5)$$

Donde:

n = velocidad en la rotación del husillo (rpm)

D = diámetro de la fresa a maquinar (mm)

V_c = velocidad de corte (m/min)

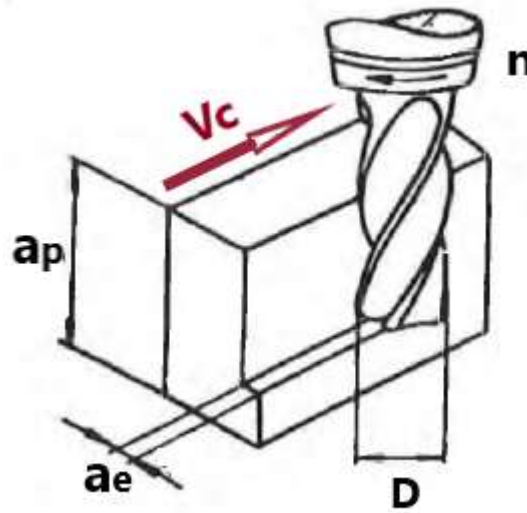


Figura 1.41 Operación de fresado: velocidad de corte (V_c), diámetro de la fresa (D), velocidad del husillo (n), profundidad de corte axial (a_p) – ancho de corte a_e . [101]

Avance

El avance es el desplazamiento relativo entre la herramienta de corte y material de trabajo. Se encuentra que la rugosidad de la superficie del material de trabajo con el aumento del avance (profundidad de los valles de las marcas de avance del desprendimiento de viruta) es proporcional al cuadro de avance por herramienta de corte [58],[101].

El avance por diente (f_z) es la distancia lineal del avance de los dientes por cada revolución de la fresa; por lo tanto, el avance por revolución de la fresa es el producto de avance por diente y el número de insertos de corte en la fresa (Figura 1.42). Para calcular f_z se usa un valor para calcular el avance de mesa V_f , número de dientes de la fresa Z_c y revoluciones del husillo n . El valor del avance por diente se calcula a partir del valor recomendado para el grosor de viruta máximo [58].

La Figura 1.42 muestra el avance por revolución (f_n), el cual es un valor que indica cuánto se desliza la fresa en una rotación completa. Específicamente, se realizan cálculos de avance para determinar la capacidad del acabado de una fresa [102] donde Z_c es el número de dientes efectivos y f_z el avance por diente

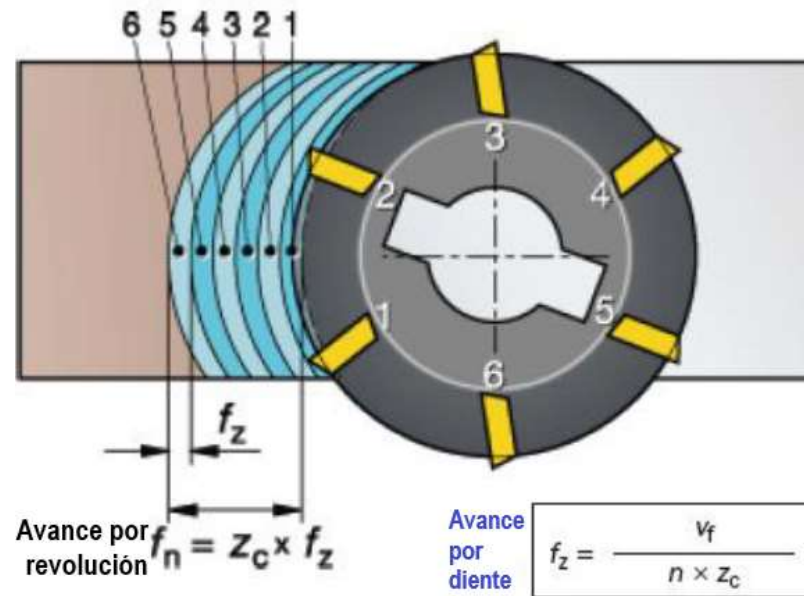


Figura 1.42 Avance por diente (f_z) y avance por revolución (f_n) de una fresa.
Fuente: Sandvik. [102]

La velocidad de avance por minuto (v_f) es también llamada avance por minuto y avance de mesa. El avance de la herramienta de corte en relación al material de trabajo está en la distancia por unidad de tiempo relacionada con el avance por diente y número de insertos en la fresa. Para obtener una mayor eficacia en el desprendimiento del material de trabajo y menores vibraciones en el avance por diente debe tener relación y cumplirse factores, como el tipo de fresa, el número de insertos, material de la fresa, dureza del material de trabajo y la profundidad de corte al maquinado.

Profundidad de corte axial (a_p) – ancho radial (a_e)

Es bien conocido que la profundidad axial de corte aumenta sus fuerzas de corte también debido a que existe una tendencia a la deflexión, o vibración en sistema de la herramienta de trabajo. Al aumentar la profundidad axial de corte, aumentará la rugosidad superficial de la pieza de trabajo al aumentar las irregularidades de la superficie [101].

Como el ejemplo en la Figura 1.43, muestra la profundidad de corte (a_p) y es la diferencia entre el radio del agujero sin mecanizar y la superficie mecanizada en dirección axial. La profundidad de corte axial máxima está limitada primariamente por el tamaño del inserto de corte y la potencia de la máquina herramienta (fresadora), y el ancho de corte de la

herramienta de corte (a_e) en empañe de corte. Es difícil en procesos de fresado en plunge por la distancia de la herramienta de corte provocará vibraciones [102].

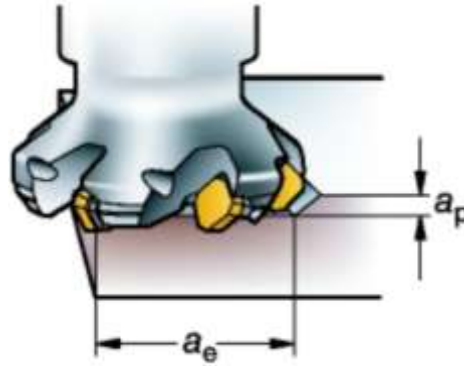


Figura 1.43 Profundidad de corte a_p y ancho de corte a_e de una fresa de insertos intercambiables. Sandvik.[102]

Refrigerante de corte

Los refrigerantes de corte es un importante componente en los sistemas de mecanizado en varias aplicaciones. Las dos principales funciones de refrigerantes de corte son: la lubricación a velocidades de corte relativamente bajas y el enfriamiento a velocidades relativamente altas. El uso de fluidos de corte durante las operaciones de mecanizado mejora la reducción del coeficiente de fricción de la herramienta de corte al material de trabajo al disminuir la acumulación de material maquinado al borde del filo de la herramienta y también ayuda reducir el desgaste de la herramienta manteniendo su flanco de corte.[82],[57],[101].



Figura 1.44 Suministro de refrigerante de corte en una operación de fresado.[96]

El fluido penetra la herramienta y reduce la adherencia entre la viruta y la cara del inserto por una reacción química con la superficie de la viruta recién formada, lo que resulta en la formación de un compuesto físicamente estable en la interfaz del maquinado Figura 1.44. El efecto de enfriamiento de un fluido de corte también ayuda a reducir la expansión térmica y la distorsión de la pieza de trabajo mejora la topografía de su superficie (alabeo –pandeo). [101]

Factores del fresado superficial

Varios factores en el acabado superficial de fresado final influyen la vida útil de la herramienta de corte entre los procesos de corte. El diagrama 1.45 muestra causas principales que intervienen las operaciones de fresado, donde además intervienen la herramienta de corte, el material de trabajo, y condiciones de mecanizado de la máquina. Estas variables se pueden controlar en la vida útil de la herramienta de corte y el fresado final depende principalmente de los parámetros de corte [101].

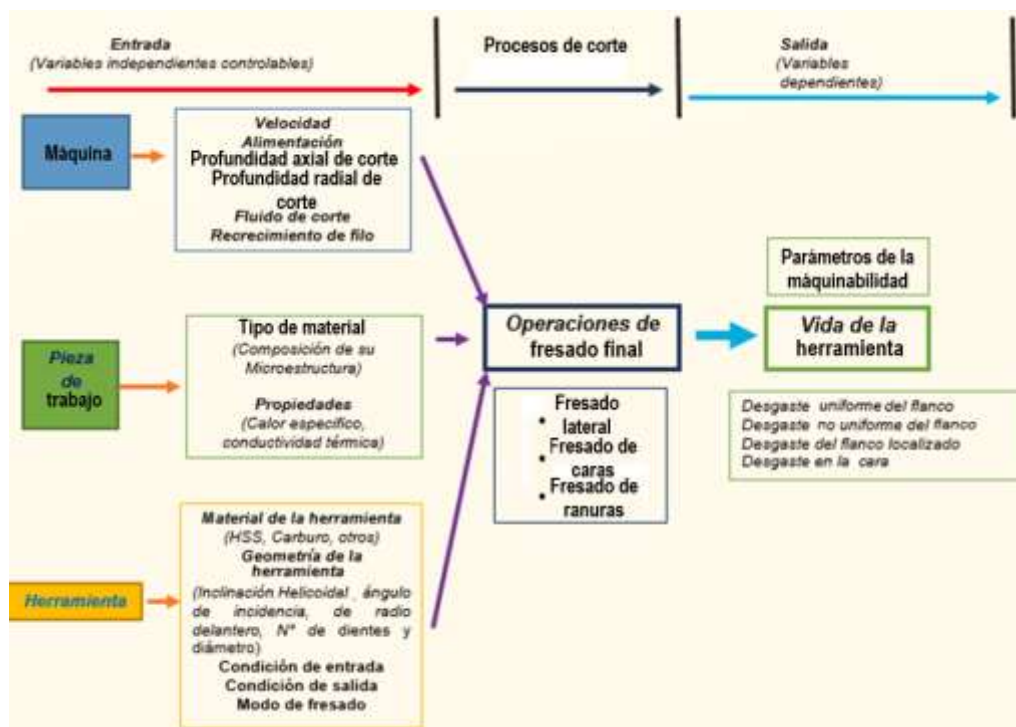


Figura 1.45 Factores que influyen en la vida de la herramienta en los procesos de fresado final. [101]

2.Desarrollo experimental

El proceso se basa desde el material sustrato, fabricación y afilado de insertos para luego lograr sus recubrimientos duros por la técnica TRD obteniendo capas de NbC–VC y realizar su procesos de mecanizado con dos tipos de material de trabajo para observar su desempeño al desgaste. Los objetivos ya mencionados y alcanzados se explican a continuación:

2.1 Material acero herramienta AISI M2

Debido a su gran dureza y resistencia al desgaste el acero herramienta AISI M2 es uno de los materiales más utilizados en herramientas de corte en la industria de mecanizado. La composición química típica del acero AISI M2, para garantizar sus elementos y aleaciones, es realizada mediante pruebas en el espectrómetro de chispa Tabla 2-1.

Promedio	Fe	83.578	Al	0.008	C	0.87	Mn	0.270	P	0.021
% Wt	S	0.007	Si	0.300	Cu	0.115	Ni	0.299	Cr	3.4
M2	Mo	4.8	V	1.9	W	6.11	Co	0.337	Sn	0.009

Tabla 2-1. Análisis de composición química Acero M2 (S 600 Bholer).

2.1.1 Diseño inserto AISI M2

Los insertos de corte se baso en el diseño de afilado de corte para fresado planear Palvit [4], con geometría de la herramienta; corte anchura en el chaflán en el vértice CWH= 1mm, ángulo de incidencia $\alpha_o = 14^\circ$ (detalle A, Figura 2.1), longitud del filo BS=1.5mm y ángulo de filo $\beta = 15^\circ$ (detalle B), el cual se observa mejor en la Figura 2.1 y ángulo de posición de corte lateral $K_r = 75^\circ$. Se realiza un agujero de 3.2 mm modificable para portamuestras de los insertos perpendicularmente al proceso de recubrimientos por la técnica TRD.

Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

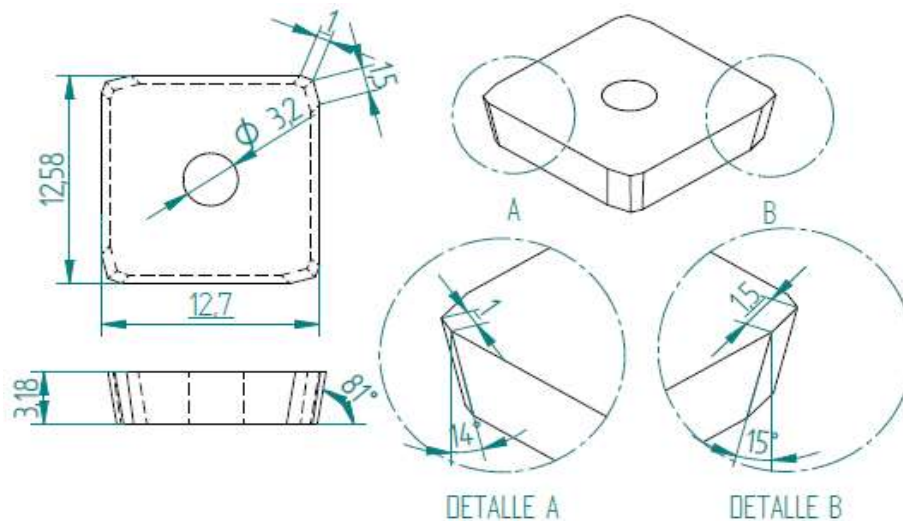


Figura 2.1 Diseño de inserto (ángulos de corte) para recubrimientos TRD NbC- VC. Fuente: Autor

2.2 Deposición por difusión termo reactiva (TRD)

La creación de capas duras por el proceso TRD se realiza mediante un horno para tratamiento térmico industrial. La Figura 2.2.a muestra el modelo 1200-110[103], el cual permite utilizar temperaturas máximas de 1200°C , con placas de aislamiento térmico y manta cerámica, que permiten la conservación de temperatura en la cámara interior. Los insertos de corte primeramente han sido precalentados en un horno eléctrico tipo mufla, marca Abarephor (Figura 2.2.b), con un sistema de control comandado por un pirómetro digital de temperatura y aislamiento de bloque cerámico que permite elevar temperaturas máximas de 900°C . Esta mufla realizó revenidos a los insertos recubiertos de 10 min y 1 hora a temperatura de 540°C .

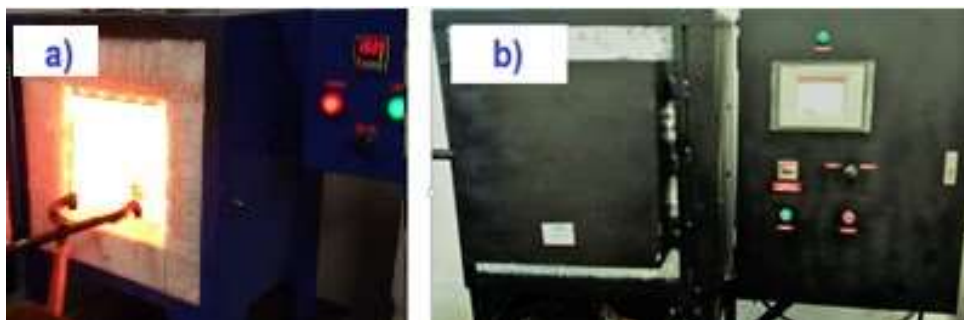


Figura 2.2 Tratamiento de recubrimiento a los insertos: a) horno para tratamiento térmico para técnica por TRD y b) horno tipo mufla utilizado para precalentamiento de insertos.

Los recubrimientos duros por la técnica TRD se llevan a cabo a temperaturas de 1050°C con la mezcla de sales fundidas de Bórax pentahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), que son partículas de elementos para la formación de carburos, partículas de ferroniobio con partículas de ferrovanadio y polvos de aluminio como un agente reductor para el tratamiento. Para un óptimo recubrimiento superficial sobre los insertos de corte se fabrica un portamuestras, como se observa la Figura 2.3, de material acero inoxidable en varillas roscadas de 1/8" y tuercas.



Figura 2.3 Montaje de insertos en crisol para recubrimientos por el proceso TRD.

El esquema completo del crisol, platina portainsertos, varillas roscadas en los extremos y tuercas de 1/8" es el montaje adecuado para los insertos a recubrir y se muestra en la Figura 2.4. Para la mezcla de las sales de bórax pentahidratado y ferroelementos se sumergen en el crisol la cantidad de 6 insertos por cada proceso TRD.

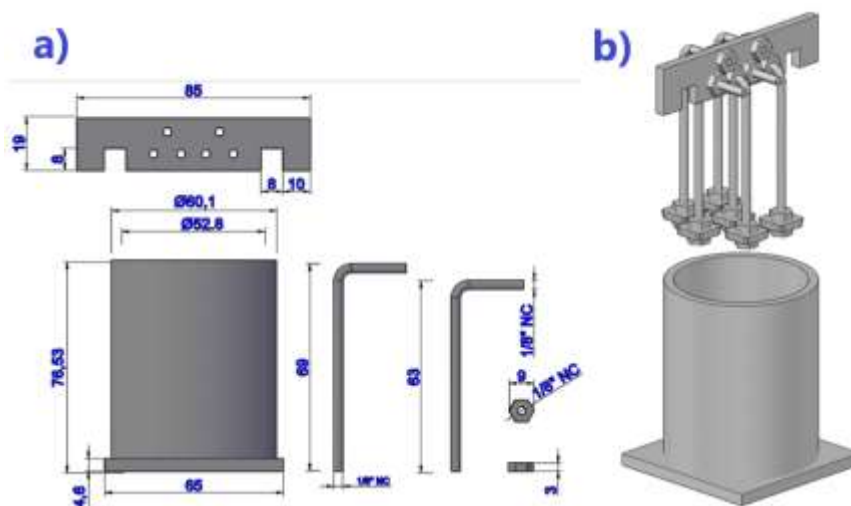


Figura 2.4 Esquema porta insertos para TRD: a) varillas roscadas 1/8", tuercas, crisol y portainsertos (mm) y b) ensamble total para el proceso TRD.

Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

Los insertos de corte afilados tuvieron un proceso de precalentamiento de 20 minutos en la mufla a 600°C. Luego de completar la fundición de los contenidos requeridos de la mezcla de sales de bórax pentahidratado y polvos de aluminio, se incluye el portamuestras con los insertos sumergiéndolo al crisol y finalmente se adicionan los ferroelementos de niobio-vanadio, después se mezcla por unos segundos el contenido para obtener un recubrimiento de la capa más homogénea posible. Según pruebas preliminares, la cantidad utilizada de la mezcla, luego de evaporarse una parte mínima del bórax, fue de 198 gramos para completar un 100%, entre ellos los ferroelementos de niobio y vanadio con un 16% (32gr) aluminio en granilla grado 2 con un 3%(6gr) y sales pentahidratado con un 81% (162gr).

Inicia el crecimiento de la capa por la difusión de átomos de carbono y EFC en el crisol a 1050 °C en el horno, al añadir por segmentos de tiempo sales de bórax pentahidratado con polvo de aluminio hasta que complete su fundición. Los recubrimientos NbC-VC con el porcentaje de composición química del baño de sales pentahidratado ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ferroelementos de niobio con vanadio sobre los insertos, tiempo de tratamiento TRD y tiempo de revenido se muestran en la tabla 2-2. El revenido según los tiempos es dividido por grupos (N1, N2, N3, N4) para aplicarlos con las condiciones de corte

Grupos	Insertos	Recubrimiento	Composición química (Wt. %)				Tratamiento TRD		Revenido	
			$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Fe -V	Fe- Nb	Al	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
N1	6	NbC-VC	81	8	8	3	1050	4	540	10
N2	6	NbC-VC	81	8	8	3	1050	4	540	60
N3	6	NbC-VC	81	8	8	3	1050	4	540	10
N4	6	NbC-VC	81	8	8	3	1050	4	540	60

Tabla 2-2. Composición química de elementos para proceso TRD de insertos de corte.

Luego de pasadas las 4 horas de tratamiento TRD, los insertos se retiran del crisol para ser sumergidos inmediatamente en salmuera durante 18 segundos para un proceso de temple. Posteriormente, se lleva a un proceso de revenido a temperatura de 540°C con tiempos de los grupos N1, N3 de 10 minutos y los grupos N2, N4 de 1 hora. Con estas condiciones, se puede observar el desgaste del flanco al inserto recubierto después del mecanizado. La Figura 2.5 presenta paso a paso el tratamiento TRD en esquemas del proceso de recubrimientos de NbC-VC sobre los insertos de corte.

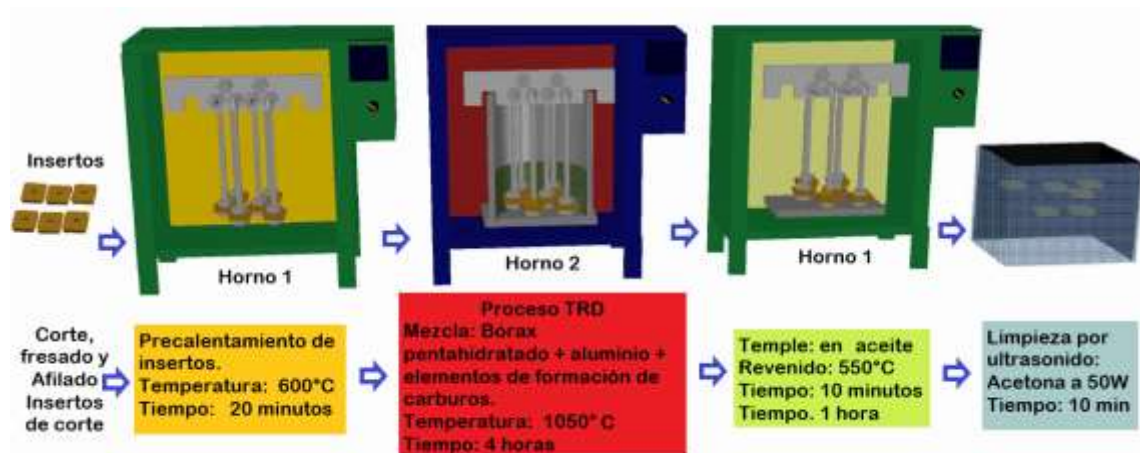


Figura 2.5 Esquema del proceso de recubrimiento por TRD sobre insertos de corte.
Fuente: Autor

2.3 Caracterización de recubrimientos por TRD

2.3.1 Difracción de rayos X (X)

Se utilizó difracción de rayos X para determinar las fases presentes en el recubrimiento realizado por el proceso TRD. El equipo utilizado fue un difractómetro marca X-PertPro Panalitical con parámetros de Bragg-Brentano. Esta medición se realizó con radiación monocromática Cu-K α de longitud de onda de 1,540 Å, intensidad de corriente de 40mA y diferencial de potencial en un rango de 10.0° a 100° con paso de 0.02°. Estos difractogramas de rayos X fueron analizados para determinar las fases presentes en los recubrimientos de la base de datos del software X'Pert High Score Plus y presentados en el software Origin Pro8 2018. [65], [67], [68]

2.4 Material de trabajo

Los materiales como aceros AISI 1045 y AISI 4140 son utilizados en empresas metalmecánicas para aplicación de equipos, maquinaria, herramientas y piezas de máquinas. Para esta investigación, se utilizaron dos materiales de trabajo mecanizados con insertos recubiertos de NbC-VC e insertos sin recubrimientos para maquinado de acero AISI 4140. Se especifican los siguientes aceros:

Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

2.4.1 Acero AISI 4140

Es un acero bonificado [104] aleado con elementos de cromo y molibdeno de alta resistencia al desgaste, tiene tenacidad en fabricación de piezas mecánicas y presenta dureza promedio de 316 HV, resistencia a la torsión y fatiga. Este acero es utilizado en piezas de dimensión mediana tales como ejes, pasadores, cigüeñales, embolo y árboles de transmisión.[5] Se realizaron pruebas de composición química mediante espectroscopia de chispa, a empezar la quema en la superficie lijada al acero AISI 4140. El resultado promedio de tres ensayos de quemas se muestra en la Tabla 2-2.

Promedio	Fe	96.845	C	0.414	Mn	0.961	P	0.022	S	0.036
% Wt	Si	0.316	Cu	0.042	Ni	0.031	Cr	0.964	V	0.010
Acero	Mo	0.208	W	0.038	Co	0.015	Ti	0.007	Sn	0.010
4140	Al	0.032	Nb	0.027	B	0.0057	Pb	0.017	Mg	0.001

Tabla 2-3. Análisis químico del material de trabajo AISI 4140 (V320 Bohler).

2.4.2 Acero AISI 1045

Es un acero aleado con dureza baja (163 HV) que proporciona una baja resistencia y tenacidad, ideal para piezas de construcciones mecánicas[6] de cortas dimensiones (menor a 60 mm). También es utilizado para la fabricación de componentes de uso general. La resistencia es un poco más alta en comparación con aceros de bajo carbono aplicados en la producción de partes de motores, pines, tornillos, cilindros, troqueles y partes de acoples.

Se analizó su composición química mediante el equipo de espectroscopia de chispa, al iniciar la quema en la superficie de una muestra lijada al acero AISI/SAE 1045. El resultado de composición del promedio de tres quemas se muestra en la Tabla 2-3.

Promedio	Fe	97.000	C	0.461	Mn	0.909	P	0.0001	S	0.009
% Wt	Si	0.269	Cu	0.029	Ni	0.032	Cr	0.940	V	0.012
acero	Mo	0.208	W	0.032	Co	0.011	Ti	0.006	Sn	0.012
1045	Al	0.027	Nb	0.023	B	0.0043	Pb	0.015	Mg	0.000

Tabla 2-4. Análisis químico material de trabajo acero AISI/SAE 1045 (V 495 Bohler).

Luego de analizada su composición química (Tabla 2-3), se observa que corresponde a un 0.461% de carbono, 0.909 de manganeso y silicio con 0.269. Este acero AISI/SAE

1045, será utilizado como material de trabajo durante pruebas de mecanizado en esta investigación.

2.4.3 Microscopia electrónica de barrido

La observación de las capas de NbC-VC y su morfología superficial de recubrimientos duros fueron realizadas en un microscopio MEB Phenom ProX con rango de magnificación óptica de electrones 80-150,00X, aceleración de voltajes 10Kv, 15Kv, magnificación 2000X-5000X análisis de elementos por EDS.

Para la examinación de los insertos en su desgaste luego del fresado final, se analizan, en el microscopio electrónico de barrido (MEB) Tescan Vega 3 SB, las aceleraciones de electrones de 10 kV-30 kV, vacío a 2000 Pa. Con magnificación entre 200X a 3450X, la espectroscopia de rayos X por energía dispersiva (EDX) se hace para analizar los elementos de capas por TRD.

2.4.4 Microscopia óptica

Se emplea un microscopio para observar las capas de la sección transversal de las muestras por la técnica recubrimientos duros por TRD, para analizar la morfología de la capa, sustrato al realizar el análisis micrográfico en metalografía (montaje de la muestra, desbaste, pulimiento, ataque químico) y su microestructura [81]. Se utilizó el microscopio metalúrgico, marca: Epi Star serie MCB/MCM adaptado a una cámara digital para microscopio, marca Amscope, 10 Mp, la cual capta imágenes en aumentos 100X, 200X, 400X y 1000X. También se utilizó un microscopio metalográfico trinocular con cámara digital y adaptador Modelo XJP- 6A, Marca Olympus.

Para la medición de dureza se empleó un micro durómetro Vickers, tipo M N°73545, marca SHIMADZU. Se empleó una carga aplicada de 25 gr, ubicada en la sección transversal de la capa, con seis ensayos para obtener un promedio de dureza. Se realiza microdureza sustrato a distancias de entre 5, 20, 40, 60 y 80 μm debajo de la capa de NbC-VC. El cálculo de la dureza Vickers HV se resuelve por la norma ASTM E92 [77].

Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

2.5 Pruebas de mecanizado

En la observación de insertos con recubrimientos por TRD de capas duras de niobio y vanadio, insertos sin recubrir se ha utilizado un centro de mecanizado vertical CNC Fadal VMC15 serie 9506015 y control periférico CNC88HS para manejar programación de trayectoria de maquinado con refrigerante sintético (Fludine). Los principales parámetros de corte a modificar de los procedimientos de experimentos fueron velocidad de corte, profundidad y avance de corte. Se adapta una fresa planeadora (Figura 2.6.b) de 3"75 grados FMA 25.4 Ref. FP-3-I –marca VERTEX [105] para el acoplamiento de los insertos de corte recubiertos por TRD como se muestra en la Figura 2.6.a. El tipo de fresado es planeado, trabajando su mecanizado en oposición. El sentido de rotación de la herramienta de corte es opuesto al avance de la pieza de trabajo.

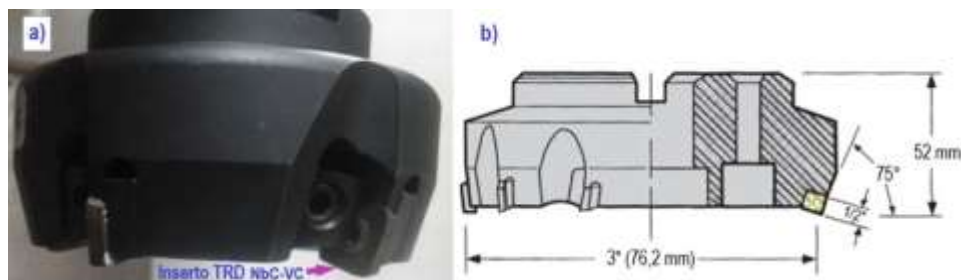


Figura 2.6. Porta insertos para maquinado: a) puesta de insertos de corte con recubrimientos NbC-VC y b) dimensiones de fresa planeadora ref. FP-3-I.[105]

2.5.1 Procedimiento de experimentos en insertos

De acuerdo con el diseño y fabricación de insertos (Figura 2.1), con recubrimientos de carburos de NbC y vanadio VC [106] se utilizan parámetros de maquinado para evaluar su desgaste. Las condiciones de corte durante las operaciones de maquinado son profundidad de corte constante $a_p=0.3$ mm, avance por revolución $f_n=0.6$ mm/rev y variables de velocidad de corte.

Las condiciones de corte en la Tabla 2.5 muestran los procedimientos de experimentos, divididos en cuatro grupos (N1, N2, N3, N4). Cada grupo consta de cinco insertos con cuatro esquinas de filo de corte. Luego del mecanizado, se va cambiando la esquina del filo del inserto de acuerdo con el cambio de parámetro de corte y material de trabajo a maquinar, acero AISI 4140 o AISI 1045.

Grupos de insertos a maquinar	Revenido a 540°C	Platinas de trabajo a maquinar
N1. NbC- VC	10 min	Acero AISI 4140
N2. NbC- VC	1 hora	Acero AISI 1045
N3. NbC- VC	10 min	Acero AISI 1045
N4. NbC- VC	1 hora	Acero AISI 4140
N5. sin recubrir	10 min	Acero AISI 4140

Tabla 2-5. División de procedimientos para el maquinado de materiales de trabajo.

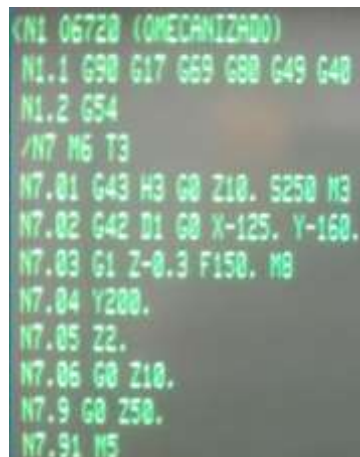
En cada grupo de procedimiento experimental se realizó el proceso de maquinado de acuerdo con los parámetros de maquinado de la Tabla 2.6. Entre los más importantes varían, revoluciones del husillo, velocidad de avance de la mesa y profundidad de corte axial.[4],[59] Los parámetros de corte depende la variable de velocidad de corte, avance por revolución $f_n = 0.6$ mm/rev y el avance por diente $f_z = 0.12$ mm obtenido del promedio de condiciones de maquinado de un inserto SPKN1203 [4]. Cada grupo consta de 16 maquinados, divididos por el tipo de material de trabajo a maquinar y los dos revenidos de 10 min y 1 hora de los insertos recubiertos. Para los insertos sin recubrir consta de 4 maquinados en platinas de acero AISI 4140.

Parámetros de corte para mecanizado por CNC. Insertos de corte de grupos de los procedimientos de experimento N1, N2, N3, N4 y N5.						
Esquinas de inserto de filo de corte	Velocidad de corte V_c (m/min)	Velocidad de rotación del husillo n (rpm)	Velocidad de avance-mesa V_f (mm/min)	Profundidad de corte axial a_p (mm)	Avance por diente f_z (mm)	Avance por revolución f_n (mm/rev)
1	20	83	50	0,3	0,12	0,6
2	30	125	75	0,3	0,12	0,6
3	40	167	100	0,3	0,12	0,6
4	60	250	150	0,3	0,12	0,6

Tabla 2-6. Parámetros de corte para grupos N1, N2, N3 N4 y N5 de mecanizado.

Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

La programación de las condiciones de corte se realiza en maquina fresadora CNC de control numérico computarizado se efectúa mediante un lenguaje llamado G & M que describen acciones simples y entidades geométricas sencillas junto con sus parámetros de mecanizado.



```
N1 06720 (OMECANIZADO)
N1.1 G90 G17 G69 G80 G49 G40
N1.2 G54
/N7 M6 T3
N7.01 G43 H3 G0 Z10. S250 M3
N7.02 G42 D1 G0 X-125. Y-160.
N7.03 G1 Z-0.3 F150. M8
N7.04 Y200.
N7.05 Z2.
N7.06 G0 Z10.
N7.9 G0 Z50.
N7.91 M5
```

Figura 2.7 Programación de parámetros de maquinado CNC Fadal VMC 15s en condición de velocidad de corte 60m/min.

Los parámetros de programación se muestran en la Figura 2.7, se indica las variables de velocidad de avance (F), revoluciones por minutos del husillo (S) a cambiar su condición de velocidad de corte a los insertos con y sin recubrimiento.

G0: Movimiento rápido
G90: Coordenadas absolutas
G17: Plano XY
G69: Ciclo fijo de desbaste
G80: Anular ciclos fijos
G49: Avance de trabajo programable
G40: Anular compensación
G54: Cero de pieza
M6: Cambio de herramienta
T3: herramienta numero 3
G43: Compensar de longitud, herramienta z
M8: Encender bomba refrigerante
M3: Encender husillo sentido horario
M5: Apagar husillo

La Figura 2.8 plantea el esquema del proceso de maquinado de los pasos de la puesta de material de trabajo para evaluar el desgaste de los insertos con y sin recubrimiento se planea en el siguiente procedimiento:

1. Montaje sobre un prensa de precisión fija la dimensión de platinas de 100X60X15mm de aceros AISI 1045 y acero AISI 4140

2. Cambiar cada esquina de los 5 insertos de acuerdo al parámetro de corte y platina de material de trabajo. Configurar ceros de maquina en el eje Z manualmente a la platina a maquinarse.
3. Comenzar con el programa según los parámetros de corte especificados en la Tabla 2-6. Sentido de corte en oposición (horario), recorrido el eje y con profundidad de $a_p=0,3\text{mm}$.
4. Desmontar platina mecanizada y realizar medición de huella maquinada desde el inicio de arranque de viruta hasta la longitud de prolongación de desgaste.

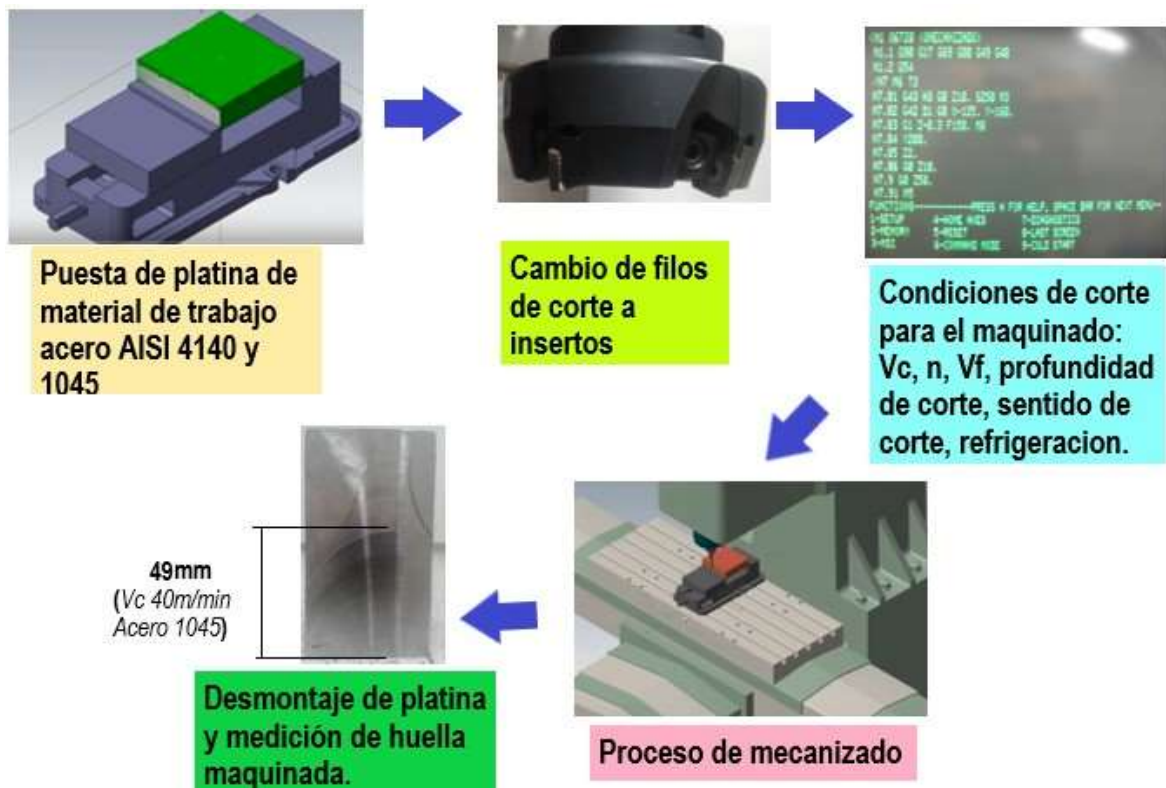


Figura 2.8 Esquema del proceso de maquinado a insertos con y sin recubrimiento.

2.5.2 Medición de desgaste en filos de corte de insertos

Los procedimientos de experimentos involucran los parámetros de corte de los insertos. Al cambiar su velocidad de corte, se obtiene el valor especificado de la zona al flanco de la herramienta de corte, posterior a los procedimientos de experimentos de la Tabla 2-6. La vida de la herramienta de corte fue establecida como el desgaste del flanco **VB** (Figura 1.34) [90]. Este se define como el ancho de la marca de desgaste medido desde el filo inicial de corte. La evaluación del desgaste del flanco de corte fue medido por imágenes

Desempeño de una herramienta de corte con recubrimientos de carburos de Nb – V obtenidos por la técnica TRD

laterales de los insertos de los grupos N1, N2, N3, N4 en un equipo con dispositivo de medición y ajuste de herramienta, marca Zoller, referencia Smile 400.[7]

3. Análisis y resultados

El estudio ha explorado las características de los insertos de corte recubiertos de carburos de niobio y vanadio, incluyendo análisis micro estructural, comparar sus propiedades mecánicas, dureza, condiciones de corte del maquinado, evaluación de desgaste de la herramienta mediante experimentos de mecanizados con dos materiales de trabajo que fueron evaluados en esta investigación.

Un ideal para este trabajo de tesis se basa en las recomendaciones para futuros trabajos de investigación reportados por Fabio Castillejo [1]. Para el estudio del comportamiento en herramientas de corte, se evaluará la cantidad de desgaste del flanco de corte de la combinación de elementos de formación de carburos duros de niobio y vanadio por la técnica TRD, con base en los mejores resultados de formación de capa. Con un tiempo óptimo de 4 horas a temperatura de 1050°C para formar carburos de NbV-VC, se reportaron durezas altas [1] y mayor espesor obtenido, con una mejor capa homogénea en la superficie.

3.1 Análisis morfológico

El crecimiento del recubrimiento depende de la nucleación microestructural de la formación del grano de la capa y porcentaje de carbono del sustrato.[107] La Figura 3.1. para el carburo de niobio muestra una excelente transición de granos aciculares, de acuerdo con el tiempo de inmersión para formar granos finos [40] Sin embargo, se ha reportado que el crecimiento de espesor del niobio es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de inmersión [108] En el VC se formaron granos equiaxiales de mayor tamaño hacia la superficie [109], reportados en aceros M2, D2 y W1. Sin embargo, en este trabajo de investigación se observan granos equiaxiales y granos columnares. El incremento de la capa puede depender del tiempo de inmersión y temperatura [110]. Por lo tanto, el espesor

de la capa de carburo de NbC-VC sobre el sustrato del acero M2 inicia con el tratamiento por el método TRD.

La Figura 3.1 muestra el inicio de formación de la capa, el crecimiento horizontal (V_h) de tamaños de granos de sub-micrón en dirección paralela al cubrir el sustrato y el crecimiento longitudinal (V_l) perpendicular al sustrato. Por esto, se pueden observar (a) granos alargados, (b) granos equiaxiales y c) granos columnares en la figura [107].

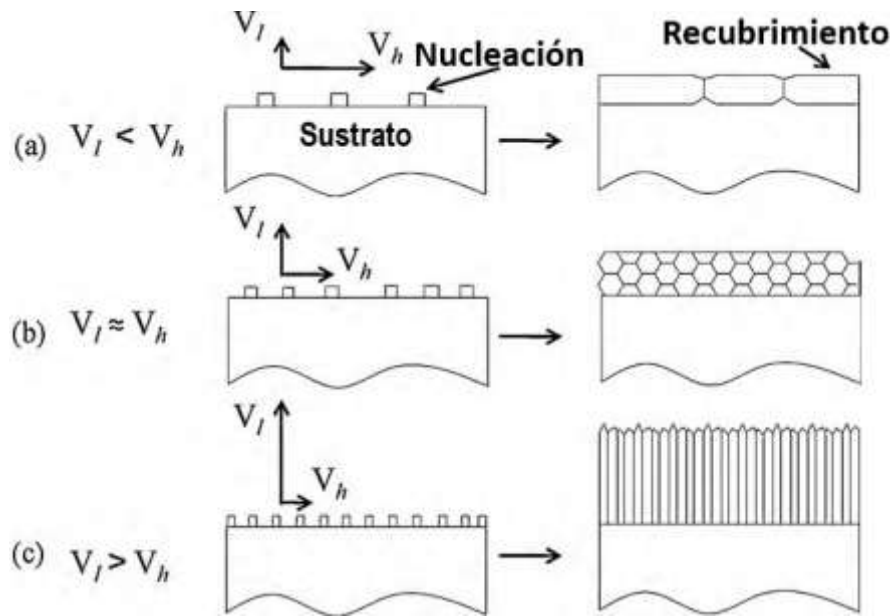


Figura 3.1 Esquema de crecimiento y nucleación de recubrimientos de NbC y VC sobre sustratos: (a) actividad con bajo carbono (b) actividad con medio carbono y (c) actividad de alto carbono. V_h : crecimiento horizontal y V_l : crecimiento longitudinal. [107]

La observación de la morfología granular de la capa en sección transversal de las muestras fueron atacadas con una solución acuosa al 10% de hidróxido de potasio (KOH) + 10% de ferrocianuro de potasio $K_3[Fe(CN)_6]$ + 100% H_2O [111]. Como se muestra en la Figura 3.2, una posible microestructura de la sección transversal del recubrimiento de NbC-VC obtiene formación granular [107],[110],[112] y se observan regiones de carburos al límite de capa de solución sólida por sustitución de granos equiaxiales desde la interfaz de la capa y el sustrato (Figura 3.2 A, punto I,II). Se observa la nucleación de granos columnares en la superficie de la capa (punto III figura 3.2 A). posiblemente porque el comportamiento de crecimiento de niobio es más visible gracias a sus energías libres de formación y poca concentración de vanadio debido a una menor difusión de átomos.[40]

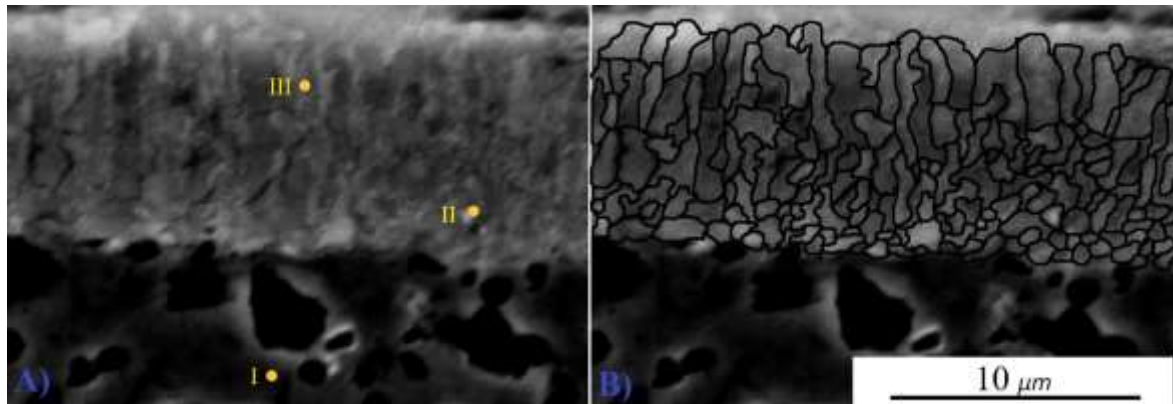


Figura 3.2 Morfología atacada con solución $K_3[Fe(CN)_6] + 100\% H_2O$ de la sección transversal del recubrimiento de NbC-VC: Capa A,B) punto I sustrato acero M2, punto II grano equiaxial y punto III grano columnar del recubrimiento.

La composición química del sustrato usado en la fabricación de insertos de corte fue conocida como acero herramienta **M2**. Esta fue confirmada en un espectrómetro de chispa y los elementos se muestran en la Tabla 2.1. Se realizaron tres pruebas para obtener un promedio respectivo de los elementos, planteados en la norma ASTM A600-92^a. El sustrato cumple con los requisitos de composición química para este tipo de acero herramienta [34] y es eficiente para la formación de capas de niobio-vanadio gracias a la energía de activación de átomos de carbono.[113],[12]

La superficie recubierta de NbC-VC al inserto fue atacada con solución $K_3[Fe(CN)_6] + 100\% H_2O$ [111]. En la Figura 3.3a., se observa la morfología superficial de carburos de niobio – vanadio sobre el sustrato de acero M2. La ampliación de la imagen MEB revela la formación de granos aciculares, gruesos y alargados [114] (Figura 3.3 b).

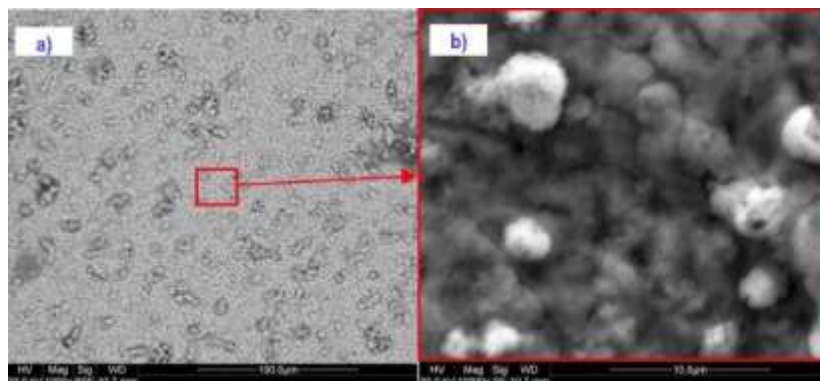


Figura 3.3 Imagen de electrones BSE, SE del inserto de la morfología superficial después de la técnica TRD a 1050°C por 4 horas: a) 1000X, b) 10000X

El análisis EDS de la capa superficial de NbC-VC se observa en la Figura 3.4, el cual confirma la presencia de elementos formadores de carburo de niobio con 72.95%Wt como mayor composición química, luego del vanadio a 16%Wt y presencia de elementos en hierro y tungsteno. Para los insertos con recubrimiento de NbC-VC de este tipo de porcentajes de elementos de Niobio y Vanadio se evaluará su comportamiento de desgaste del flanco de corte con respecto a insertos sin recubrimiento de acuerdo con las mismas condiciones de maquinado.

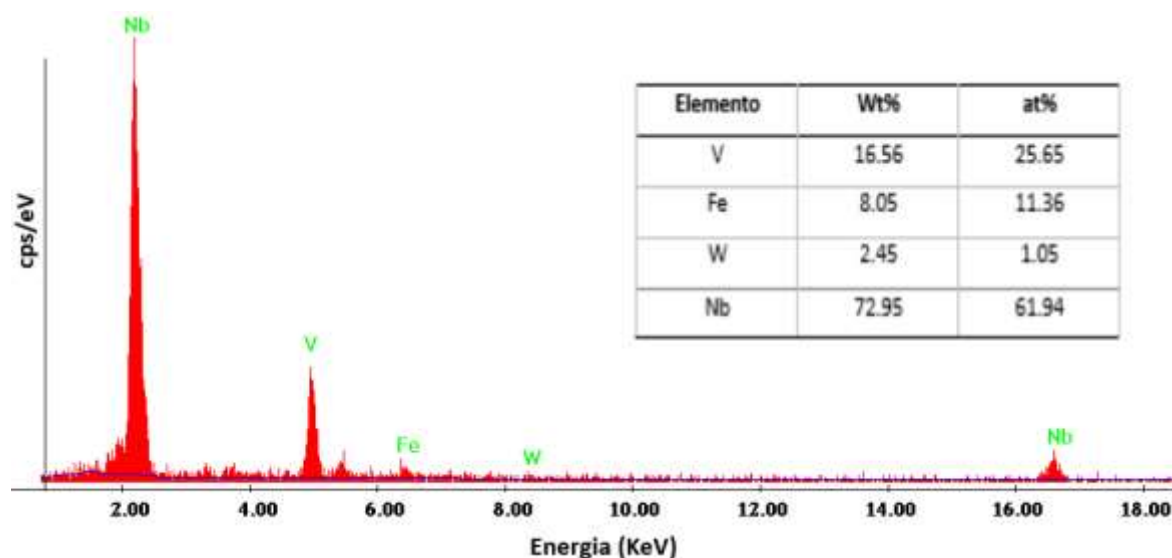


Figura 3.4 Patrón EDS de la capa superficial NbC-VC atacada.

3.1.1 Capa

La formación de recubrimientos duros de niobio y vanadio con la mezcla de bórax pentahidratado y aluminio especificada en la Tabla 2.2 de la composición química de elementos para proceso TRD de insertos de corte. La técnica de deposición termo reactiva obtuvo una capa homogénea, como se observa en la Figura 3.5 con la imagen de sección transversal a una longitud aproximada de 5000 μm y magnificación de 46X.

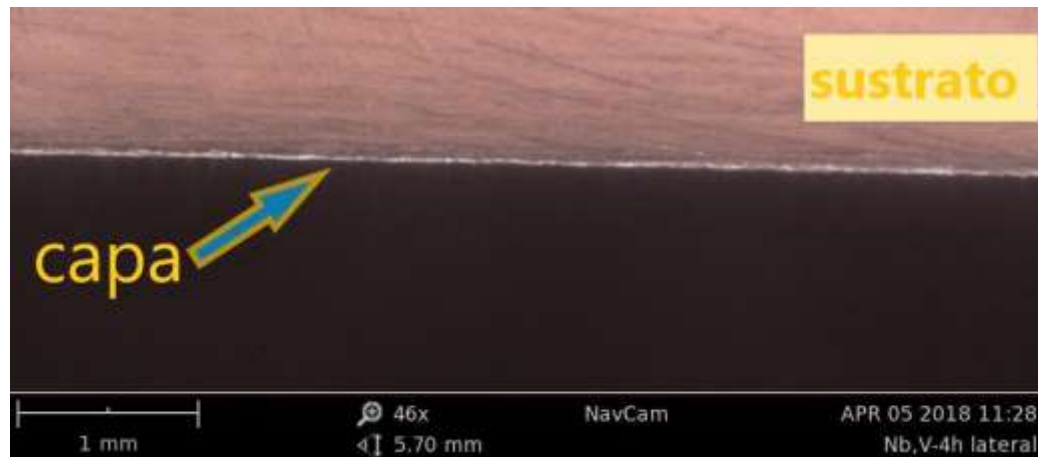


Figura 3.5 Sección transversal de recubrimientos por TRD de NbC-VC 4hr producidos en insertos de corte.

Se observó un recubrimiento en la sección transversal del inserto, en un área de $60\text{ }\mu\text{m} \times 60\text{ }\mu\text{m}$ a través de un microscopio electrónico de barrido MEB Tescan Vega 3 SB, aceleraciones de electrones de 10 KV, vacío a 2000 Pa, con magnificación de 3450X.

La medición de la capa se dio entre $8,54\text{ }\mu\text{m}$ y $9,86\text{ }\mu\text{m}$ en la formación de recubrimientos por la técnica TRD de NbC-VC y tiempo de 4 hr sobre el sustrato, como se muestra en la Figura 3.6 A. En investigaciones anteriores, se establece el espesor entre los $1,9\text{ }\mu\text{m} \pm 0.2$ y $13.7\text{ }\mu\text{m} \pm 0.2$ para recubrimientos por la técnica TRD, dependiendo del acero herramienta [28],[19].

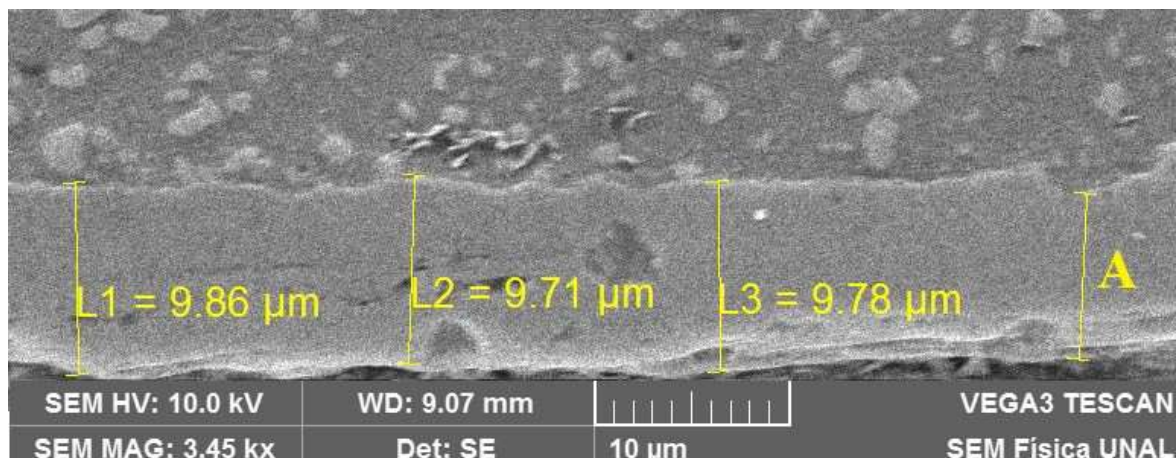


Figura 3.6 Sección transversal de capa de NbC-VC con espesor de capa entre $8,54\text{ }\mu\text{m}$ y $9,86\text{ }\mu\text{m}$

La Figura 3.7 muestra la microestructura MEB superficial del inserto con magnificación de 700X y potencia de 15 Kv, en un área aproximada de 300 μ m x 300 μ m. La mayor parte de su superficie presenta uniformidad del recubrimiento de NbC-VC en el acero herramienta M2. En pequeñas áreas, hay la presencia de poros y carburos no debidos en la capa. Sin embargo, la presencia de estas imperfecciones no afecta el recubrimiento de los filos de corte de los insertos.

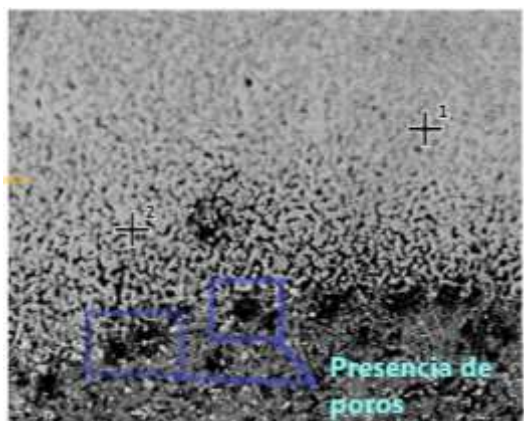


Figura 3.7 Imagen MEB de la capa superficial de NbC-VC X700X de un acero M2 con posible presencia de poros.

3.2 Composición química del recubrimiento-sustrato

Las pruebas de espectrometría de dispersión de energía (EDS) en equipo MEB de la universidad ECCI [70] evidencia la presencia de elementos de niobio y vanadio en la capa del inserto de acero herramienta M2. Al analizar zonas puntuales en un área de 300 μ m x 300 μ m de la sección transversal de la interfase del sustrato, se evidencia la presencia de otros elementos (Figura 3.8). En la tabla 3.1, se recopila la composición química de las zonas puntuales 1 y 2 con alto porcentaje de concentración atómica de elementos de Nb y V. En el anexo A (EDS sección transversal), se compendian micrográficas de las otras zonas puntuales, composición química y espectros.

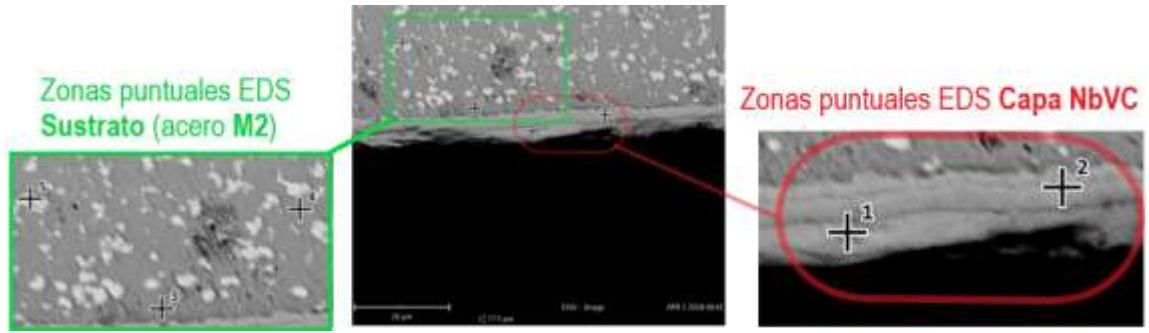


Figura 3.8 Micrografía de zonas puntuales para composición química en capa (NbC-VC) y sustrato

Zonas Puntuales EDS (+)	Elementos - Concentración atómica %														
	Nb	V	Fe	Pm	C	N	Ti	Sr	Zr	O	Si	Cr	Al	Mo	W
1 (capa)	39.5	25.9	20.2	1.5	12.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 (capa)	27	17.7	1.9	0	9.9	16.4	1.9	2.4	1.2	0	0	0	0	0	0
3 (sustrato)	0.9	1.9	58.8	0	2.1	0	1.5	1.7	0	23.7	2.6	2.5	4.3	0	0
4 (sustrato)	0.9	3.6	68.3	0	3.1	7.3	0	0	0	0	0	4.5	0	8.5	3.8
5 (sustrato)	0.8	1.2	88.3	0	2.9	0	0	0	0	0	0	3.7	0	2.2	0.9

Tabla 3-1. Composición química de zonas puntuales entre el sustrato (M2) y la capa (NbVC)

Los espectros EDS de la Figura 3.9 da resultado en zona puntuales 1- 2, muestra altos picos de vanadio y niobio y elementos duros por confirmar en el recubrimiento por el proceso TRD. Los espectros 3, 4 y 5 evidencian alta concentración atómica de elementos de hierro, oxígeno, aluminio e inclusiones, por lo que se sospecha la presencia de contaminantes de residuos en el proceso de la técnica TRD posterior del tratamiento

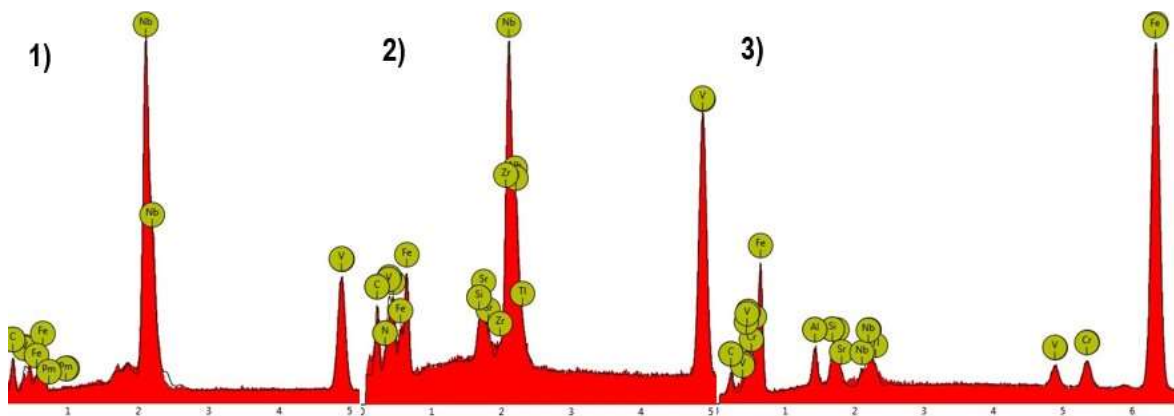


Figura 3.9 Espectros de zonas puntuales por EDS en sección transversal de inserto: (1),(2) capa de NbC-VC y (3) sustrato M2

Se observan espectros EDS de la zona superficial del recubrimiento, evidenciando elementos de niobio y vanadio con un porcentaje alto en concentración atómica en las zonas puntuales 1, 2 y de acero herramienta M2 como sustrato en zona puntual 3. La Figura 3.10 proporciona resultados en promedio de porcentaje de V de 14% y de Nb de 40% de concentración. Los demás elementos hallados se muestran en la Tabla 3-2. En el anexo A (EDS capa superficial), se encuentran recopilados espectros de zonas puntuales con composición química y demás resultados, de elementos del recubrimiento formado.

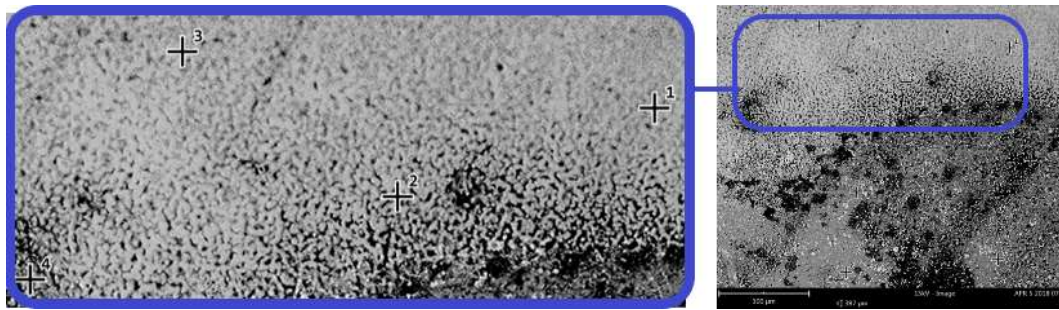


Figura 3.10 Micrografía de zona superficial del recubrimiento NbC-VC

Zonas puntuales EDS (+)	Elementos - concentración atómica %											
	Nb	V	Fe	Pm	C	Tl	Sr	Zr	O	Si	Mo	W
1	43.6	11.6	10.5	0	24.0	3.2	3.0	2.2	0	2.0	0	0
2	43.7	11.3	11.1	0	23.5	2.9	3.4	1.9	0	2.2	0	0
3	44.3	12.6	8.0	0	26.0	2.9	2.7	1.9	0	1.7	0	0
4	32.8	14.5	22.1	0	19.6	3.3	3.7	1.7	0	2.3	0	0

Tabla 3-2. Composición química de zonas puntuales del recubrimiento superficial de NbC-VC.

3.3 Microdureza

Los resultados de dureza se realizaron con cada probeta-inserto de recubrimiento de NbC-VC en dos revenidos a 540°C por 10 minutos y por 1 hora. En el ensayo de microdureza Vickers HV, se tomaron cinco datos de la capa en sección transversal para hallar un promedio de dureza HV y hacer la conversión a dureza Rockwell HRC. Se realizó un ensayo de microdureza al sustrato en un equipo de micro durómetro Vickers SHIMADZU a distancias de 5,15,40,60 y 80 μm , como se observa en la Figura 3.12 ,.



Figura 3.11 Ensayo de microdureza vickers HV sección transversal de recubrimiento duro de NbC, VC y sustrato M2. X400 micro durómetro SHIMADZU

Los resultados en la Tabla 3-3 se obtuvieron de pruebas de microdureza realizadas en materiales de trabajo (acero AISI 1045 y 4140), insertos sin recubrimiento y del recubrimiento-sustrato de portamuestras de la Figura 3.11 sección transversal de la capa NbC-VC y diferentes tratamientos de revenido de los insertos. Por tanto, se evidencia que durante más tiempo de revenido, disminuye la dureza tanto en el recubrimiento como al sustrato y los aceros base, de material de trabajo están con la dureza establecida.

Material	Diagonal - promedio	Dureza Vickers HV 25gf - 10s	Dureza Rockwell HRC	Promedio Dureza Vickers HV 25gf - 10s	Promedio Dureza Rowckell HRC
Acero 4140 base	11,25	366,3	37	349,7	35,4
	12,45	299,1	29		
	11,25	366,3	37		
	11,5	350,5	36		
	11,25	366,3	37		
Acero M2 base	11,2	369,6	38	422,4	42,8
	10	463,6	46		
	10,4	428,6	43		
	10,25	441,3	45		
	10,65	408,7	42		
Inserto sin recubrir M2 rev 10 min	8	724,4	61	695,5	59,5
	7,5	824,2	65		
	9,2	547,7	52		
	8,4	657	58		
	8	724,4	61		
Capa sección transversal NbC-VC rev 10 min	4,4	2.394,60	484	2103,6	317,1
	4,9	1.930,90	226		
	5	1.854,40	198		
	4,55	2.239,30	378		
	4,86	1.962,80	238		
Capa sección transversal NbC-VC rev 1 hora	4,55	2.239,30	378	860,6	65,8
	7,25	882,0	66		
	7,3	870,0	66		
	6,8	1.002,6	71		
	7,5	824,2	65		
	7,75	771,9	63		
	7,55	813,3	64		

Tabla 3-3. Resultados de microdureza vickers HV: sustrato, material de trabajo, insertos con y sin recubrimiento.

Los resultados de pruebas de microdureza en comparación con la distancia se muestran en la Figura 3.12 en la sección transversal, de acuerdo con [115].se recomienda que aceros se logra máxima dureza de trabajo están marcados entre temperaturas de 500 a 580°C.[116]. En la Figura 3.12, se muestran los resultados de pruebas de microdureza en los insertos, con seis datos en el recubrimiento por TRD de NbC-VC y otros cinco datos del sustrato después de la capa, en distancias de profundidad hacia el núcleo de 5 μm ,15 μm ,40 μm ,60 μm y 80 μm . El sustrato **rev x 10 min** de la Figura 3.13 muestra un promedio de microdureza de 2122 HV en la capa y 711HV en el sustrato. La gráfica de la Figura 3.12 de **rev x1 hora** muestra un promedio 1075 HV en la capa y 483HV en el sustrato. La información de ensayos de microdureza de la capa dura de NbC-VC y sustrato M2 se encuentra ampliada en el Anexo B. En el maquinado de materiales de trabajo, con insertos

con revenido de 540°C x 10 minutos se prolongó más el tiempo de mecanizado e incrementó significativamente su endurecimiento. Por el contrario, en el maquinado de material de trabajo con insertos de revenido a 540°C x 1 hora disminuyó su resistencia al desgaste. Por lo tanto, esta herramienta de corte puede tender a un desgaste más elevado al flanco de corte debido a su disminución de dureza.

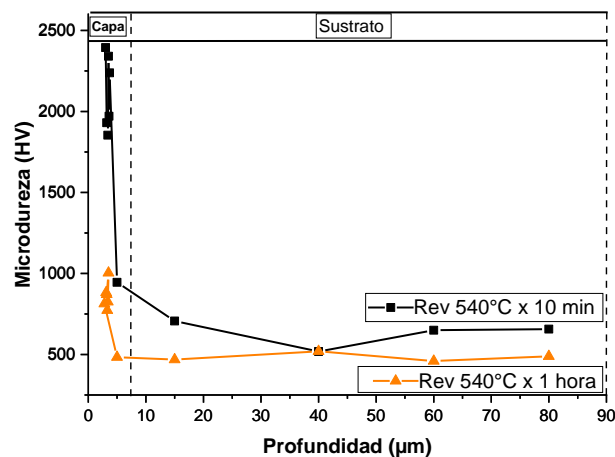


Figura 3.12 Gráfica de microdureza versus distancia de la sección transversal capa de carburo NbC-VC con tratamientos de revenido de 540°C X 10 min y 540°C X 1 hora.

3.4 Análisis microestructural

Varias investigaciones han utilizado el acero herramienta M2 por la técnica TRD en varios métodos (nitruración, borización, carburación) [12], [14], [32], sin embargo, generalmente se analizan patrones y fases formadas, obtenidos mediante de difracción de rayos X (DRX). En este trabajo, se analizó la caracterización de los recubrimientos duros de carburo de niobio y vanadio obtenidos por TRD, observando patrones en la capa superficial de recubrimientos binarios de NbC, estudiado en artículos previos. [13],[28]

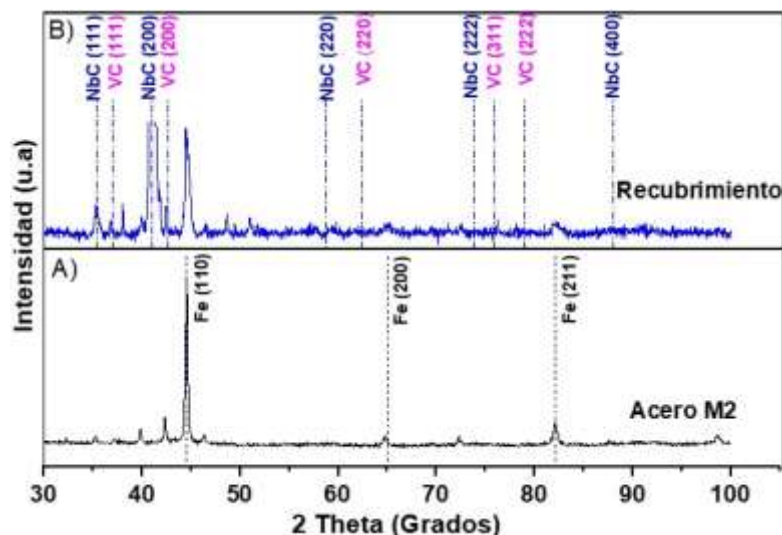


Figura 3.13 Espectros por difracción de rayos X: a) sustrato M2 y b) recubrimientos de NbC-VC por TRD

Los patrones de difracción por rayos X en sustrato de acero herramienta M2 (Figura 3.13.a) corresponden a picos de hierro Fe con planos cristalográficos (hkl) de (110), (200), (211). La Figura 3.13.b muestra los patrones de los recubrimientos producidos en los insertos de corte con capas de carburo de niobio (NbC) y capas de carburo de vanadio (VC) con tratamientos térmicos de revenido en horno industrial a temperaturas de 540°C por 10 minutos. En los carburos de niobio (NbC), de acuerdo con la base de datos (NbC- JCPDS 03-065-8783) del software High Score Plus, se evidencia una estructura cristalina FCC, donde se observan planos cristalográficos y orientaciones en picos de (111), (200), (220) y (222), (400) en los que el ángulo 2 Theta corresponde a 35.073, 40.72, 58.949, 74.116 y 88.189. En los carburos de vanadio (VC) con base de datos (VC – JCPDS-03-065-8074), se muestran picos de alta intensidad en el plano cristalográficos y orientaciones en (111) y (200); también se observaron orientaciones de picos bajos en (220), (222) y (311). Los ángulos 2 Theta en cada fase son 37.376, 43.429, 63.098, 75.693 y 79.707.

3.5 Análisis de desgaste del inserto

Los procedimientos de maquinado de la Tabla 2-5 y de acuerdo con los parámetros de corte de la Tabla 2-6 muestra el desgaste de los insertos ilustrados en micrografías MEB Tescan Vega 3 y análisis de zona puntual EDS de los recubrimientos duros por TRD de carburo de niobio -vanadio con de los grupo N1,N3.

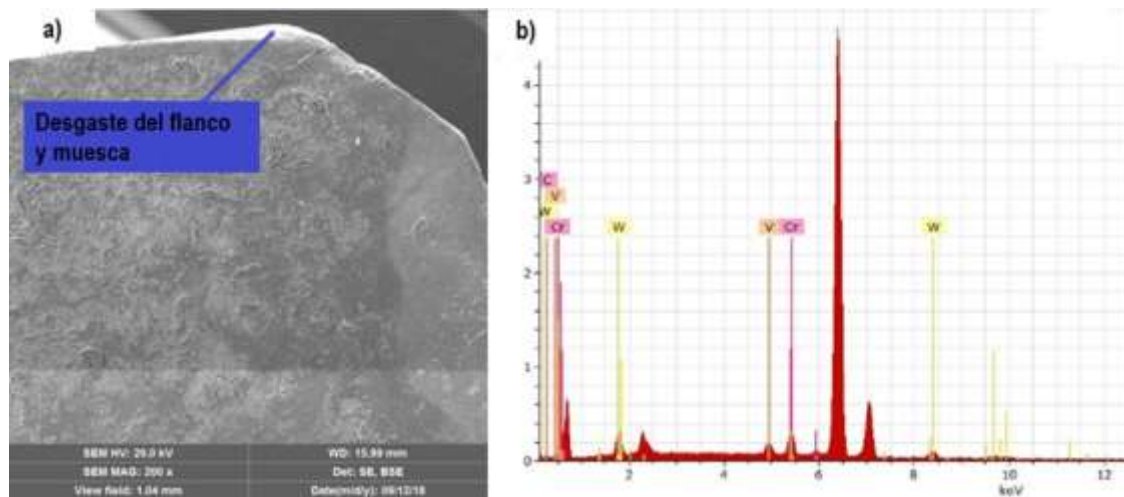


Figura 3.14 Inserto de NbVC N4 velocidad de corte 30 m/min maquinando acero 4140: a) desgaste del flanco y muesca 200X y b) análisis EDS.

La Figura 3.14a muestra la micrografía del inserto de NbC-VC por TRD, velocidad de corte 30 m/min revenido de 1 hora a 540°C, luego del maquinado con material de trabajo acero AISI 4140 el inserto evidencia desgaste del flanco y desgaste de muesca es debido a la disminución de la dureza de la capa y sustrato ver Tabla 3-3. Sin embargo es posible este desgaste por al aumento de velocidad de corte y avance de la mesa en el procesos de maquinado.[84] Aunque en la zona de desgaste de muesca se evidencia el espectro Figura 3.14b el análisis EDS, la baja concentración atómica de carburo de vanadio con 6,33% y no hay presencia niobio. El Anexo C recopila la tabla de composición química de demás elementos del espectro.

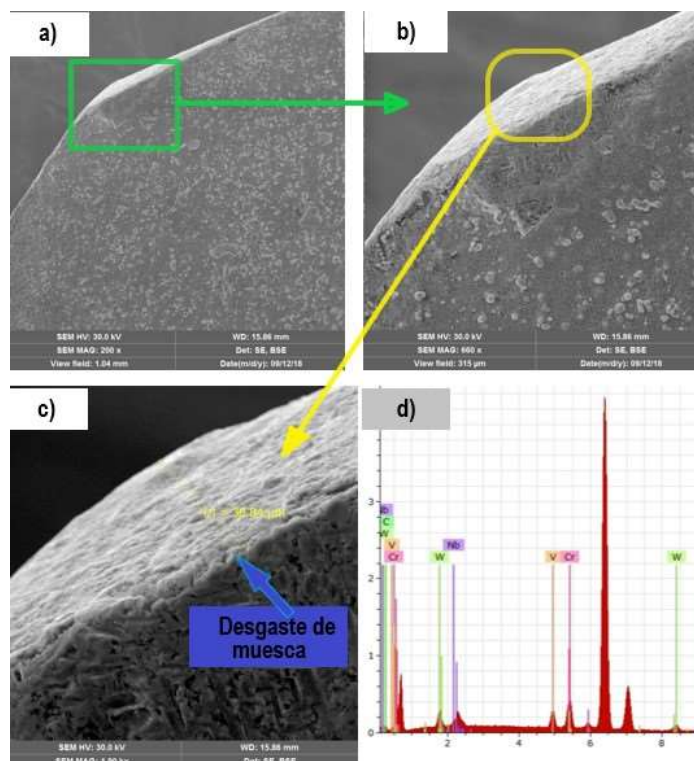


Figura 3.15 Inserto de corte NbVC N4 -Vc 60 m/min: a) 200X, b) 660 X, c) 1900X desgaste de muesca y d) análisis EDS.

La micrografía del inserto con recubrimiento de NbC-VC por TRD con revenido de 1 hora a 540°C del grupo N4 se muestra en la Figura 3.15a, b velocidad de corte 30 m/min luego del maquinado de platina de material de trabajo acero AISI 4140. El inserto evidencia desgaste de muesca posiblemente al incremento de fuerza de corte por el aumento de velocidad de corte y avance.[61],[84] En la Figura 3.15c se muestra la distancia de desgaste de muesca de $L1=38.84\mu m$ y en la Figura 3.15d se realiza análisis EDS donde no se evidencian elementos del recubrimiento por TRD con menor valor de composición química de vanadio 5,89%at, niobio 3.38 %at y carbono 76, 8%at. En el Anexo C se recopilan demás elementos de composición de espectro y micrografías del inserto en equipo MEB Tescan Vega 3.

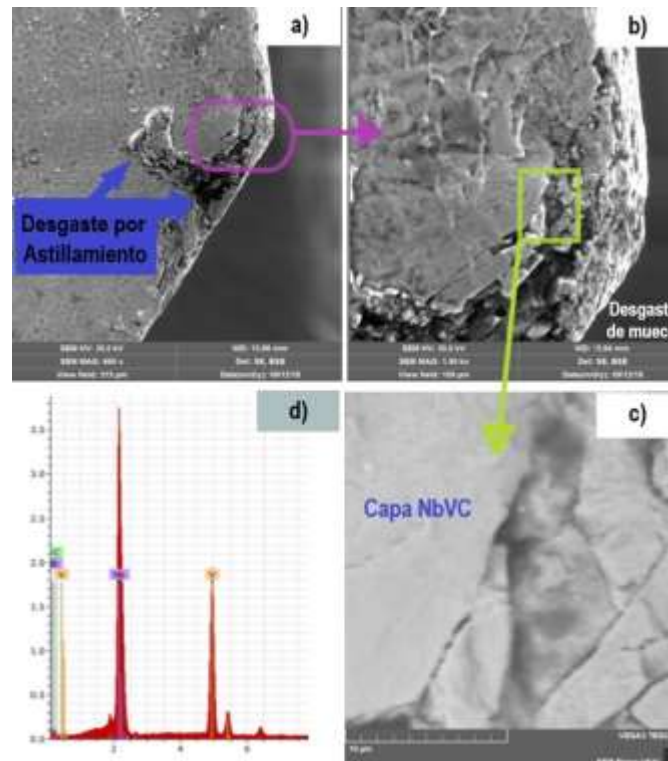


Figura 3.16 Inserto de corte NbVC N1 Vc 60m/min: a) desgaste por astillamiento 200X, b) desgaste de muesca 660 X, c) capa NbVC 1900X y d) análisis EDS de la capa.

El inserto con capa dura por TRD NbVC N1 de la Tabla 2-5, con velocidad de corte 60 m/min al maquinar material de trabajo acero AISI 4140 en la Figura 3.16.a, la micrografía evidencia desgaste por astillamiento, debido al posible incremento de fuerza y formación de rebabas. [61] Otro factor de desgaste por filo recrecido (build up edge) de acumulación de viruta material de trabajo en el filo de corte promovió el desgaste por astillamiento (chipping) del inserto [117]. La Figura 3.16.b en aumento 660X se observa desgaste por muesca, esto se debe al aumento de velocidad de corte[84], no es adecuada para la aplicación de maquinado en el material de trabajo acero AISI 4140. La Figura 3.16c muestra delaminación de la capa de NbC-VC y se cerciora su composición química por EDS con presencia de elementos de niobio 26,98%at y vanadio 17,56%at Figura 3.16.d

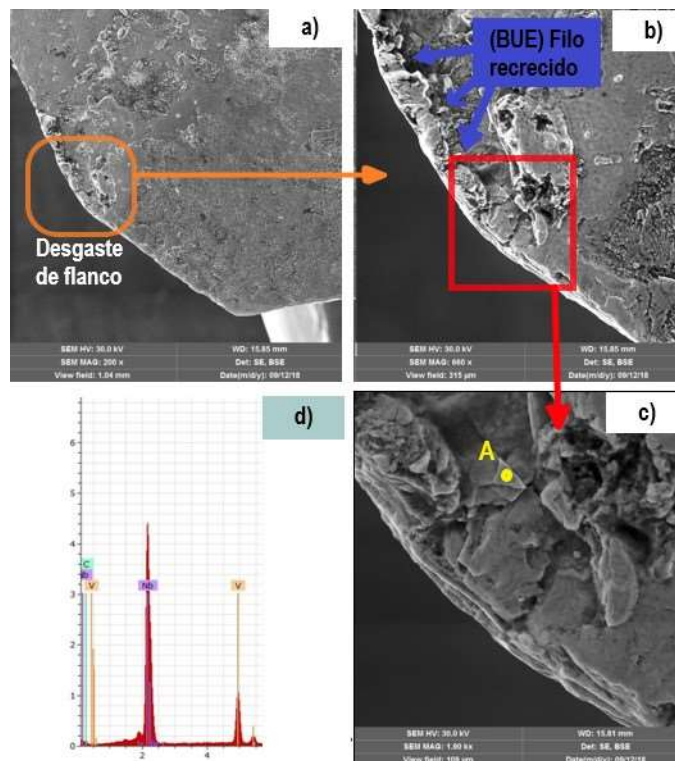


Figura 3.17 Inserto de corte NbVC N1 esquina 2 Vc 30m/min: a)desgaste de flanco 200X, b) desgaste por borde aumentado 660 X, c) zona puntual **A** de la capa NbVC 1900X y d) análisis EDS

La Figura 3.17a y b muestra desgaste de flanco, filo recrecido (Built-up edge) en el inserto con capa dura por TRD NbV-VC del grupo N1 de la Tabla 2-5, esquina 2 con velocidad de corte $V_c = 30$ m/min en material de maquinado acero AISI 4140. Este desgaste produce deterioración de la superficie final, posible incremento de fuerza de corte, y delaminación del recubrimiento [61][118]. La Figura 3.17c, evidencia la zona puntual **A** de composición química de la capa de NbC-VC al inserto con presencia de elementos de niobio 35.54%at y vanadio 15.17%at. En el espectro d Figura 3.17, se evidencian otros porcentajes atómicos (at) de elementos que se recopilan en anexo C.

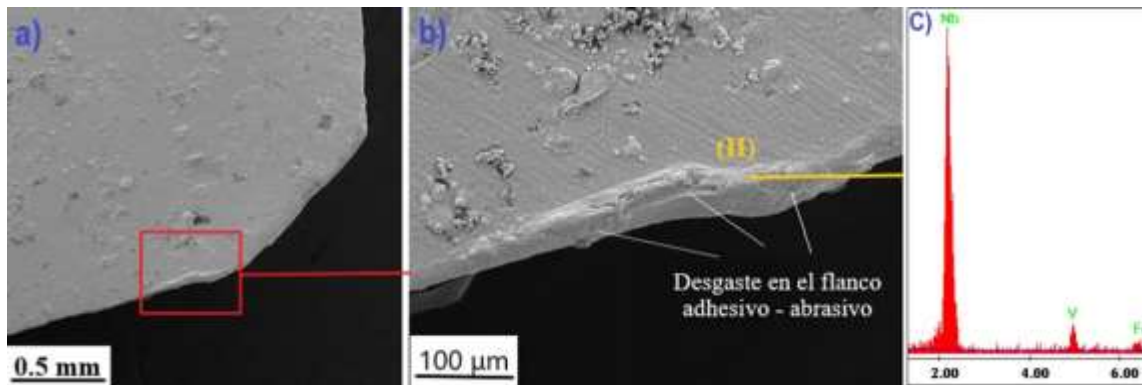


Figura 3.18 Micrografía MEB inserto NbVC, N3 desgaste flanco de corte adhesivo-abrasivo en a), b) y análisis EDS c) en el punto (II) Vc 30m/min, maquinando acero AISI 1045.

Para la velocidad de corte a 30 m/min, al maquinar acero AISI 1045 se obtuvo un mayor rendimiento en los insertos de corte. En la Figura 3.18 a y b, inserto con capa dura por TRD NbV-VC del grupo N 3 se observa un desgaste en el flanco de corte que evidencia un desgaste adhesivo y desgaste abrasivo[61],[83] después del proceso de corte. En la zona puntual (II), la Figura 3.18c confirma su composición química de niobio 84.8%at, vanadio 9.15% at por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva EDS.

Los resultados de los insertos de corte por TRD con capa de NbC-VC muestran que la velocidad de corte como importante parámetro influirá en el desgaste en el filo del flanco de corte, desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, desgaste de nariz, desgaste de muesca, filo recrecido (BUE) y hasta desgaste por astillamiento. Esto se debe a variables como la velocidad de avance de la mesa y la profundidad de corte al fresado planear.[119]. Los ensayos experimentales de los grupos N1, N2, N3, N4, confirman los parámetros de mecanizado propuestos para este tipo de insertos con recubrimiento duro de niobio – vanadio y N5 para insertos sin recubrimiento.

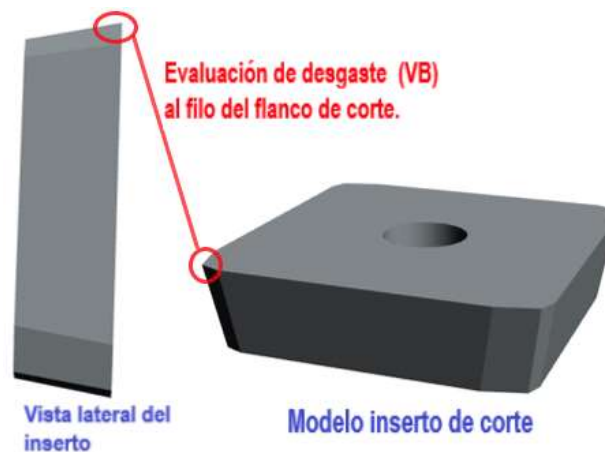


Figura 3.19 Modelo CAD del filo de flanco de corte para evaluar desgaste (VB) luego del fresado final.

De acuerdo con el diseño modelado en CAD del inserto para recubrimiento de NbVC por TRD (Figura 3.19) se toman datos con el dispositivo de medición y ajuste Zoller[7], donde se obtuvieron datos de medidas entre 0,044 y 0,279 mm de desgaste del flanco(VB), del filo del inserto, al variar parámetros velocidad de corte, dos tiempos de tratamientos térmicos de revenido y dos tipos de materiales de trabajo a maquinar, longitud de huella de maquinado desde el inicio de arranque de viruta hasta la provocación al desgaste se ven en la Tabla 3-4.

Los datos del maquinado de insertos sin recubrimiento del grupo N5 al mecanizar platinas de acero 4140 evidencio un mayor deterioro en el flanco de corte $VB = 0.2 \pm 0.04$ mm en todas las velocidades de corte y poca eficiencia en el maquinado de este material de trabajo. Mientras los insertos con recubrimiento del grupo N3 al mecanizar platinas de acero 1045 se obtuvo el menor desgaste del flanco y una eficaz longitud de huella de maquinado (100 mm) en velocidades de corte de 20 y 40 m/min.

Tipo de prueba a insertos	Vc=20 m/min			Vc= 30 m/min			Vc= 40 m/min			Vc=60 m/min		
	VB (mm)	Longitud Huella de maquinado (mm)	Tipo desgaste	VB (mm)	Longitud Huella de maquinado (mm)	Tipo desgaste	VB (mm)	Longitud Huella de maquinado (mm)	Tipo desgaste	VB (mm)	Longitud Huella de maquinado (mm)	Tipo desgaste
N1. NbC- VC revenido 10 minutos, platina maquinada acero 4140	0,103	100	Flanco	0,177	63,5	Nariz Filo recrecido	0,257	78,5	nariz	0,255	23,5	Muesca Astillamiento
N2. NbC- VC revenido 1 hora, platina maquinada acero 1045	0,059	100	Flanco	0,242	29	Nariz	0,249	49	nariz	0,25	14	(BUE) Filo recrecido
N3. NbC- VC revenido 10 minutos, platina maquinada acero 1045	0,037	100	Flanco	0,244	53,5	Flanco Nariz	0,176	100	flanco	0,203	39	(BUE) Filo recrecido
N4. NbC- VC revenido 1 hora, platina maquinada acero 4140	0,044	100	Flanco	0,279	9	Flanco Muesca	0,235	47,5	nariz	0,271	26	Flanco Nariz
N5. sin recubrir revenido 10 minutos , platina maquinada acero 4140	0,205	30,5	Muesca	0,257	3	Muesca	0,271	2,5	Muesca	0,279	2	Muesca

Tabla 3-4. Medición al desgaste del flanco de corte (VB) longitud huella de maquinado de aceros AISI 1045, 4140 y tipo de desgaste despues del maquinado a insertos con y sin recubrimiento.

El equipo de medición de herramientas Zoller se utilizó con el debido montaje para medir el desgaste del flanco (VB) de vista lateral después del mecanizado por arranque de viruta con parámetros de corte Vc a 20, 30,40 y 60 m/min en materiales de trabajo acero AISI 4140 y 1045.

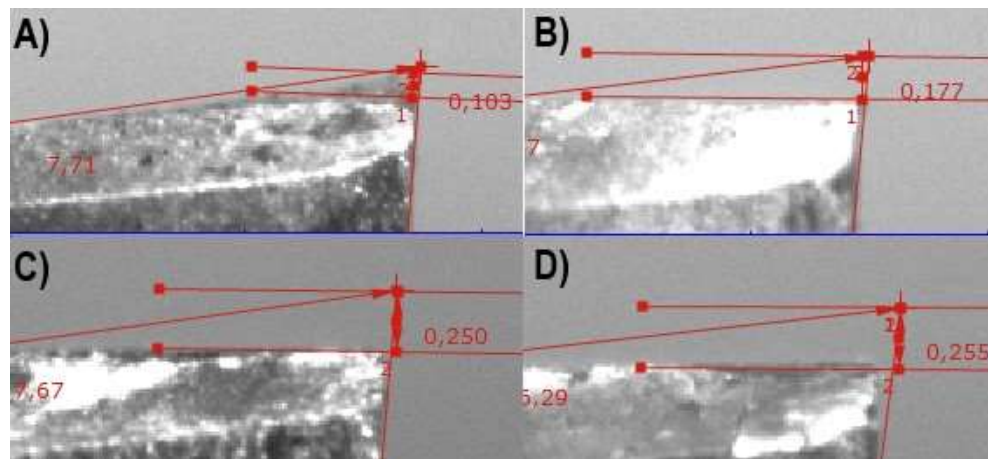


Figura 3.20 Medición de desgaste (VB) insertos grupo N1 NbC-VC 4hr Rev 540°X 10 minutos – maquinado acero 4140 a) 0,103mm, b) 0,177mm, c) 0,257mm y d) 0,255mm.

En los insertos del grupo N1 con capa de NbC-VC X 4hr con revenido a 540°C por 10 minutos se maquinaron en material acero AISI 4140. En la Figura 3.20, se evidencia desgaste abrasivo, abrasivo y astillamiento en la imagen d) debido al aumento de su velocidad de corte por el aumento de variables de velocidad de avance 150 mm/min y velocidad del husillo de 250 rpm con profundidad de 0.3mm. El desgaste del flanco (VB) fue de $0,25 \pm 0,05$ mm, es probable a que se deba a la dureza del material de trabajo acero AISI 4140 por tener aleaciones y porcentaje de carbono al 0.4%.

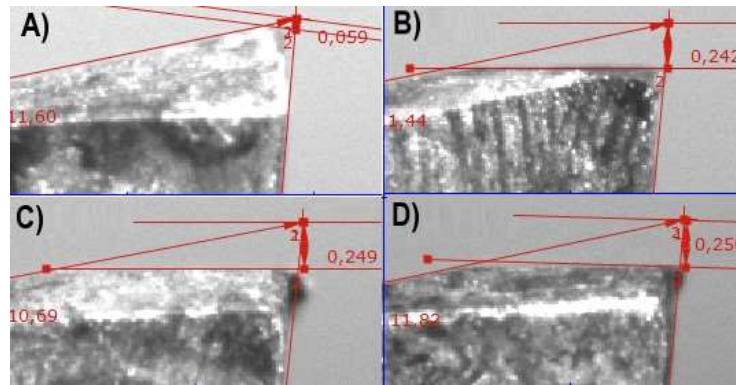


Figura 3.21 Medición de desgaste (VB) insertos grupo N2 NbC-VC 4hr Rev 540°X 1 hora – maquinado acero 1045: a) 0,059mm b) 0,242mm c) 0,249mm d) 0,250mm.

Se evidencia el promedio de desgaste del flanco de los insertos del grupo N2 revenidos por 1 hora en material maquinado acero AISI 1045, como se evidencia en la Figura 3.21 b, c y d de $VB = 0,246 \pm 0,004$ mm. Este desgaste se debe a que el tratamiento térmico de revenido a 540°C por un lapso de una hora disminuyó su dureza en la capa de NbC-VC hasta los 1075 HV. El inserto de la Figura 3,21a con $V_c = 10$ m/min presentó menor esfuerzo al maquinado y por lo tanto presenta un menor desgaste en el flanco de $VB = 0,059$ mm con material de trabajo acero AISI 1045.

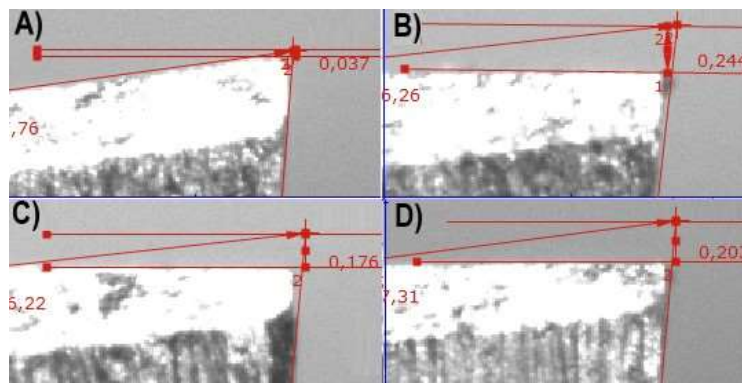


Figura 3.22 Medición de desgaste (VB) insertos grupo N3 NbC-VC 4hr Rev 540°X 10 minutos – maquinado acero 1045: a) 0,037mm, b) 0,244mm, c) 0,176mm y d) 0,073mm.

La tenacidad aumentó en los insertos de la Figura 3.22.A. con tratamiento térmico de revenido a 540°C por 10 minutos, donde mostró su bajo desgaste en el flanco de corte

(VB) de menos de 8 centésimas de milímetro, por lo cual se sugiere que los insertos del grupo N3 son los que prolongo más vida útil de la herramienta de corte al mecanizado del material de trabajo de acero AISI 1045 con carbono de 0.10%. Los insertos de la Figura 3.22 b y c presentaron más desgaste al flanco de corte $VB= 0,244, 0,176$ y $0,203$ décimas de milímetro posiblemente el inserto no soporto el esfuerzo de maquinado a este material en velocidades de corte en 30, 40 y 60 m/min.

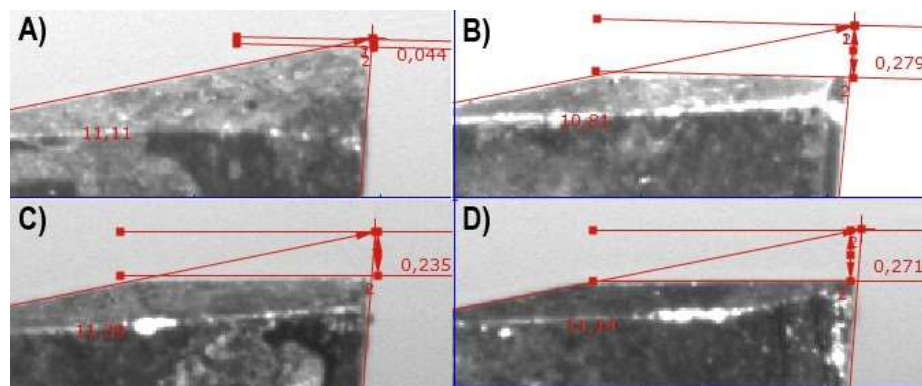


Figura 3.23 Medición de desgaste (VB) insertos grupo N4 NbC-VC 4hr Rev 540°X 1hora – maquinado acero 4140 a) 0,044mm b) 0,279mm c) 0,235mm d) 0,271mm.

Luego de mecanizar los insertos de revenido a 1 hora del grupo **N4** con material de trabajo acero AISI 4140 se evidencia baja dureza en el recubrimiento a 1075 HV (Tabla 3-3) y un deterioro en la capa superficial, lo cual indica un aumento al desgaste del flanco de corte de promedio $VB= 0,250 \pm 0.018$ mm en los insertos de la Figura 3.23b, c y d. Sin embargo, al realizar mecanizados con velocidades de corte bajas, ($V_c=20$ m/min) el desgaste del flanco del inserto a $VB= 0.044$ mm tiende a ser mínimo, debido a sus bajas condiciones de corte en: velocidad de avance (V_f) 50 mm/min, velocidad el husillo (n) 83 rpm también especificados en la Tabla 2.6.

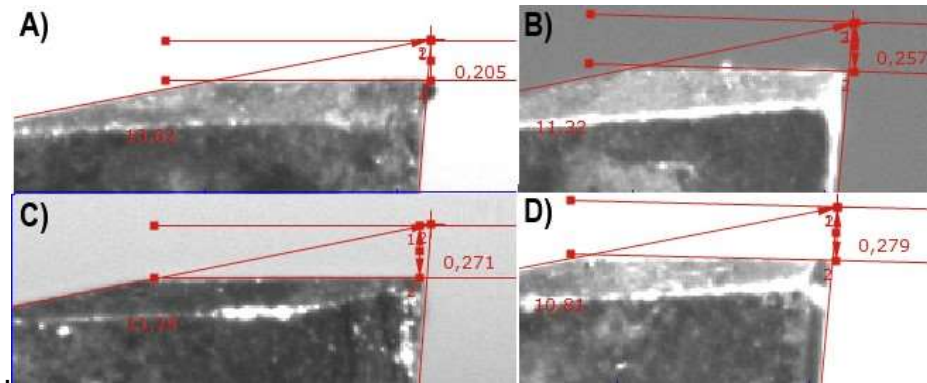


Figura 3.24 Desgaste del flanco VB de insertos sin recubrir N5, condiciones de corte: A) 20, B) 30, C) 40 y D) 60m/min.

Los resultados de los insertos sin recubrimientos muestran un mayor desgaste en el flanco de corte VB (Figura 3.24) en los insertos de (A) 0.205 mm, (B) 0.257mm, (C) 0.271mm y (D) 0.279mm. Al maquinar material de trabajo platina acero AISI 4140, se produce más esfuerzo durante el maquinado del inserto sin recubrir lo que tiende a aumentar el desgaste en el flanco de corte. Es posible que se esto deba a su porcentaje de carbono, aleantes y dureza.

Desgaste del flanco Vs velocidad de corte del inserto

Varias investigaciones [120],[121],[83],[122] observaron el desgaste en el flanco de corte del inserto como en torneado y fresado. La velocidad de corte es un factor importante que influye en el desgaste de la herramienta de corte que influye el desgaste del flanco y vida útil de la herramienta.[84]

Se plantea posterior al mecanizado la medición de desgaste del flanco (**VB**) en función de velocidad de corte a insertos recubiertos en diferentes revenidos e insertos sin recubrir al maquinar dos materiales de trabajo. De acuerdo con las condiciones de velocidad de corte en pruebas de maquinado a materiales de trabajo en platinas aceros AISI 1045 y AISI 4140 al valor de la longitud de 100 mm X 60mm y espesor de 15mm. La presencia de desgaste por abrasión, adhesión y astillamiento [61] se debe al aumento de velocidad de corte $V_c=30,40,60\text{m/min}$, dado que incrementa la fuerza de corte, lo que provocando un deterioro en el inserto y el material de trabajo, a acortar su vida útil de maquinado.

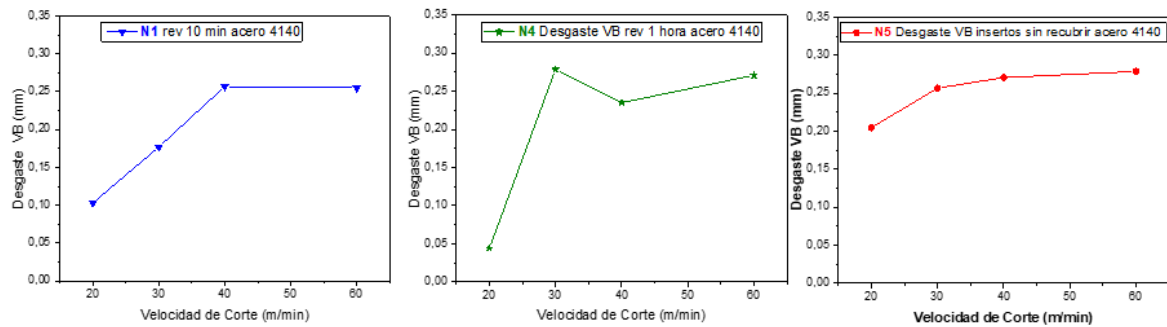


Figura 3.25 Relación entre el desgaste del flanco (VB) y la velocidad de corte (V_c) durante el mecanizado de platina de acero 4140 de insertos: N1 recubiertos NbC-VC revenido 10 min, N4 recubiertos NbC-VC revenido 1 hora y N5 sin recubrir revenido 10 min.

Al maquinar platina de acero AISI 4140 la Figura 3.25 N5 se puede ver la gráfica que los insertos sin recubrimiento se desgastaron más rápidamente que los insertos con recubrimientos de NbC-VC del grupo N1 con revenido de 10 minutos a bajas velocidades de corte 20, 30 m/min. Se evidencia que los recubrimientos de carburo niobio-vanadio son eficientes a estas velocidades.

Sin embargo la figura 3.25 del grupo N4 se muestra la gráfica los insertos con recubrimiento NbC-VC revenido por una hora presentaron más desgaste a velocidades de corte 30 y 60 m/min, esto se debe a que disminuyó su dureza en la capa y el sustrato de los insertos por el tratamiento térmico de revenido (Tabla 3-3). Los tipos de desgaste, huella de maquinado y valores de desgaste del filo de los insertos se ven en la tabla 3-4.

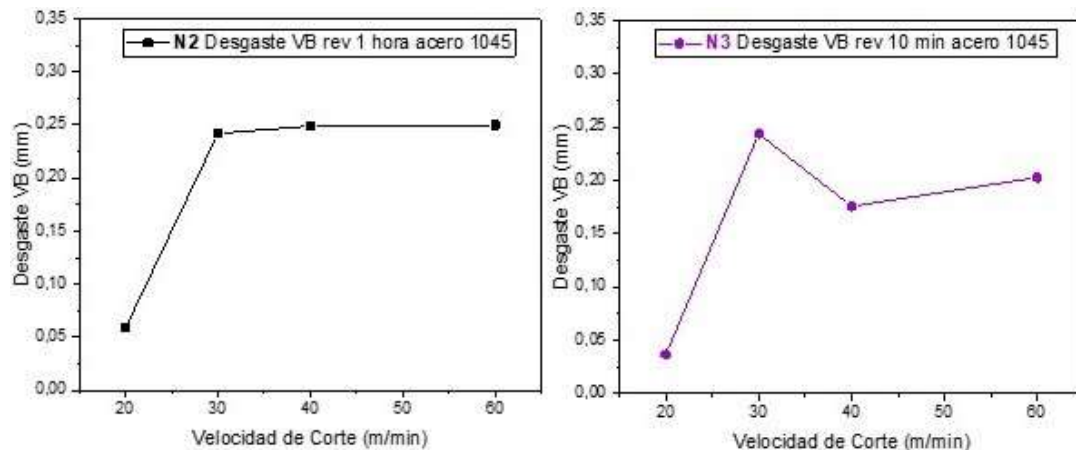


Figura 3.26 Relación entre el desgaste del flanco (VB) y la velocidad de corte (V_c) durante el mecanizado de platina de acero 1045 de insertos: N2 recubiertos NbC-VC revenido 1 hora y N3 recubiertos NbC-VC revenido 10 min.

El maquinado de platinas de material de trabajo acero AISI 1045 presento una mayor eficiencia en los insertos de la Figura 3.26 N3 de recubrimientos NbC-VC revenido 10 minutos en 20,40 y 60 m/min por su mejor dureza en el recubrimiento y sustrato.

Se evidencia un mayor deterioro en los insertos del grupo N2 Figura 3.26 debido a que se realizó revenido por 1 hora, disminuyendo su dureza y tenacidad a prolongar más rápido su desgaste. Sin embargo para velocidades de corte 20m/min, se observa un leve desgaste en el flanco de 0.037 mm ver Tabla 3-4, es posible se deba que a menor velocidad de corte disminuye la fuerza de corte aumentado su vida útil para maquinar.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Los recubrimientos de carburos de niobio y vanadio sobre los insertos están compuestos de granos, equiaxiales y columnares. La capa tiene un valor de $9,66 \pm 0.203$ μm de espesor y dureza promedio de 2103 ± 100 HV. Usando DRX se confirmó que los recubrimientos estaban compuestos de carburos de NbC y VC con una estructura cristalina FCC, donde se observan planos cristalográficos con orientaciones en picos de (111), (200).

De acuerdo a las pruebas de maquinado, la velocidad de corte optima con mejor desempeño se puede deducir es de 20 m/min y la vida útil de insertos con recubrimiento se ve afectada negativamente por encima de la velocidad de corte 30 m/min. Aunque para los insertos sin recubrimientos afecto subida útil en todas las velocidades de corte.

Se demostró tipos de falla en insertos con recubrimiento de desgaste de flanco a velocidades de corte en 20 m/min, desgaste de nariz, flanco, muesca, para velocidad de corte en 40 m/min, desgaste de filo recrecido (BUE), muesca, flanco, nariz y por astillamiento se presentó para velocidades de corte en 60 m/min.

4.2 Recomendaciones

Se requiere investigación, evaluar la aplicación de recubrimientos por TRD en otros tipos de herramienta de corte, para así observar el mejor desempeño, mejor vida útil, menor desgaste de flanco de corte luego del maquinado

Durante el proceso, se obtuvieron eficientemente los recubrimientos con elementos de formación de carburos de ferroniobio y ferrovanadio. Se considera realizar recubrimientos con ferroelementos de ferrocromo y ferrotungsteno para analizar sus condiciones de dureza y resistencia en el corte a insertos por recubrimientos ternarios y cuaternarios.

Se considera que para la aplicación de insertos con recubrimientos de NbC-VC se debe realizar más investigación con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas al modificar las condiciones de tratamiento TRD, revenido y tratamiento del sustrato.

Se propone realizar investigación del estado de la herramienta de corte del método indirecto. Implica estudiar el comportamiento de fuerzas, al utilizar el dinamómetro para fresadora en el estudio experimental de fuerzas durante el mecanizado de acuerdo a la condición que se pueden evaluar; profundidad de corte, velocidad de corte y avance.

ANEXO A

Resultados EDS sección transversal

Resultados de análisis por EDS en equipo MEB (universidad ECCI) una cantidad de 5 zonas puntuales en la sección transversal de la capa de carburo de niobio y carburo de vanadio sobre un acero herramienta (M2) del tratamiento por TRD con elementos de formación de carburos al emplear un 8% de ferro-niobio y 8% de ferro-vanadio por 4 horas a 1050°C.

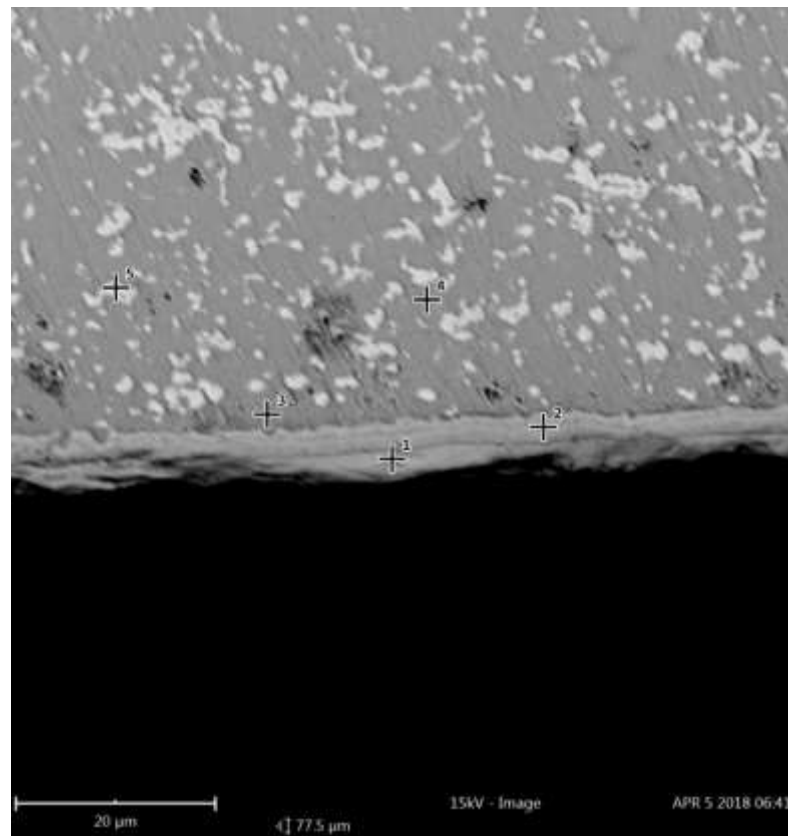
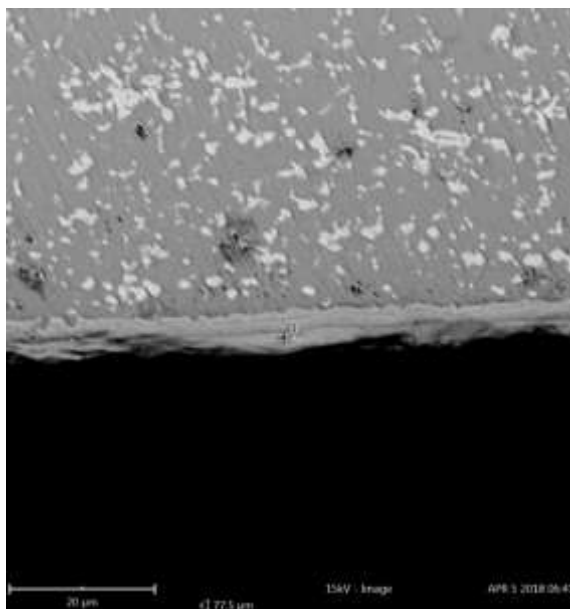


Ilustración A-1. Micrografía de Nb-V-4h –EDS en zonas puntuales –sección transversal



Zona puntual 1

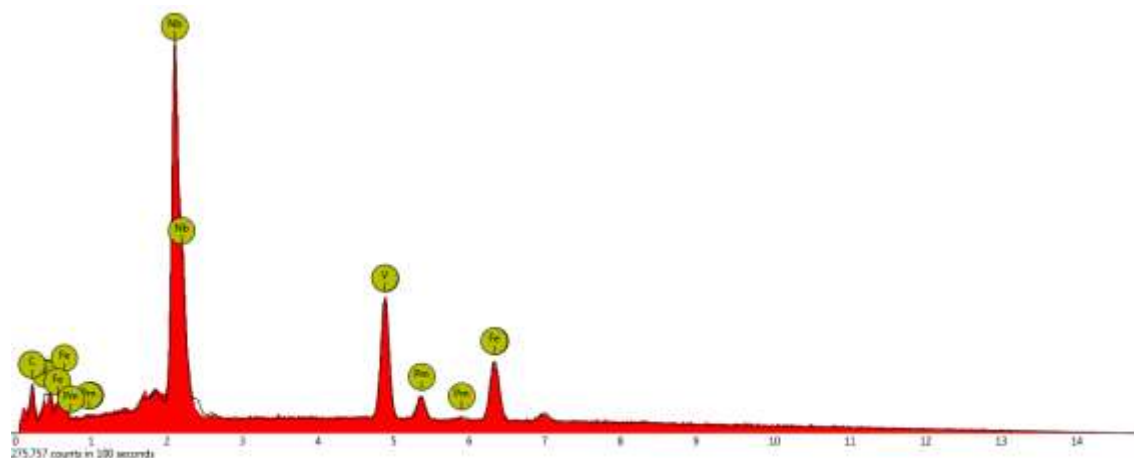
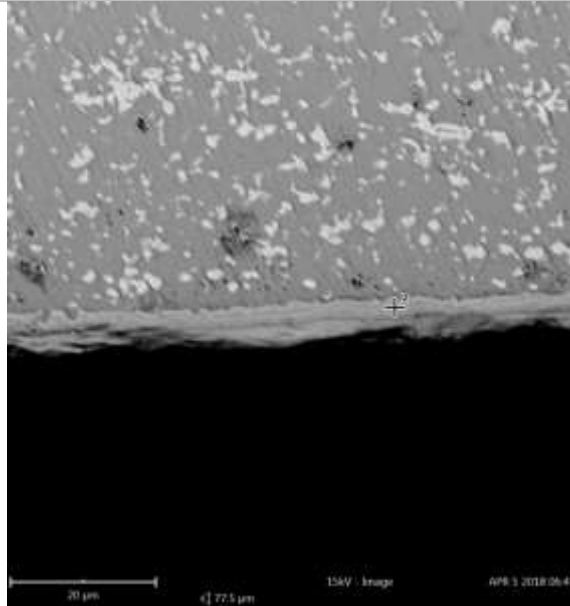


Ilustración A-2. Detalle de la zona puntual 1: a) micrografía MEB y b) espectro de elementos

Tabla A-1. Elementos de la zona puntual 1- sección transversal

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
41	Nb	Niobio	39.5	0.0
23	V	Vanadio	25.9	0.1
26	Fe	Hierro	20.2	0.1
61	Pm	Prometio	1.5	0.1

6	C	Carbono	12.9	0.8
---	---	---------	------	-----



Zona puntual 2

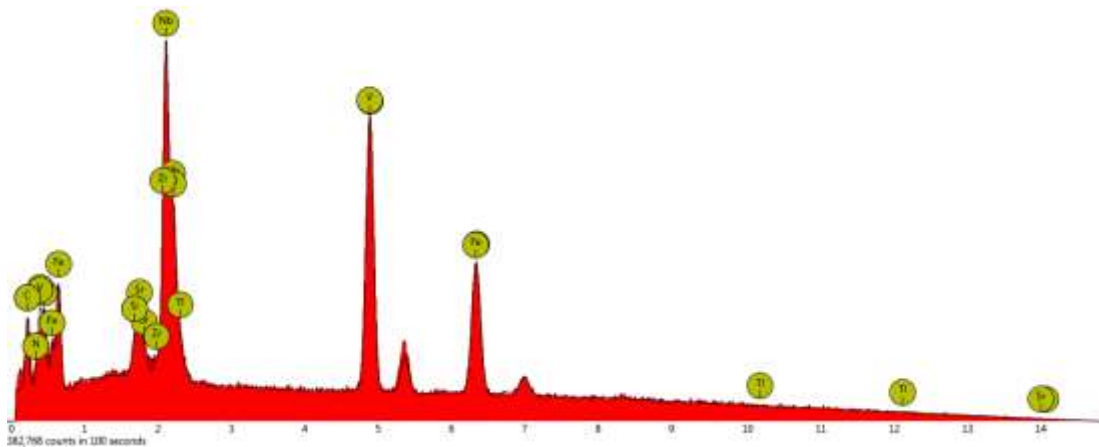


Ilustración A-3. Detalle de la zona puntual 2: a) micrografía SEM y b) espectro de elementos

Tabla A-2. Elementos de la zona puntual 2 - sección transversal

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
23	V	Vanadio	27.0	0.1
41	Nb	Niobio	17.7	0.0
81	Ti	Talio	1.9	0.0
26	Fe	Hierro	21.2	0.1
38	Sr	Estroncio	2.4	0.1
14	Si	Silicio	2.3	0.2
6	C	Carbono	9.9	1.0
40	Zr	Zirconio	1.2	0.0
7	N	Nitrógeno	16.4	2.3

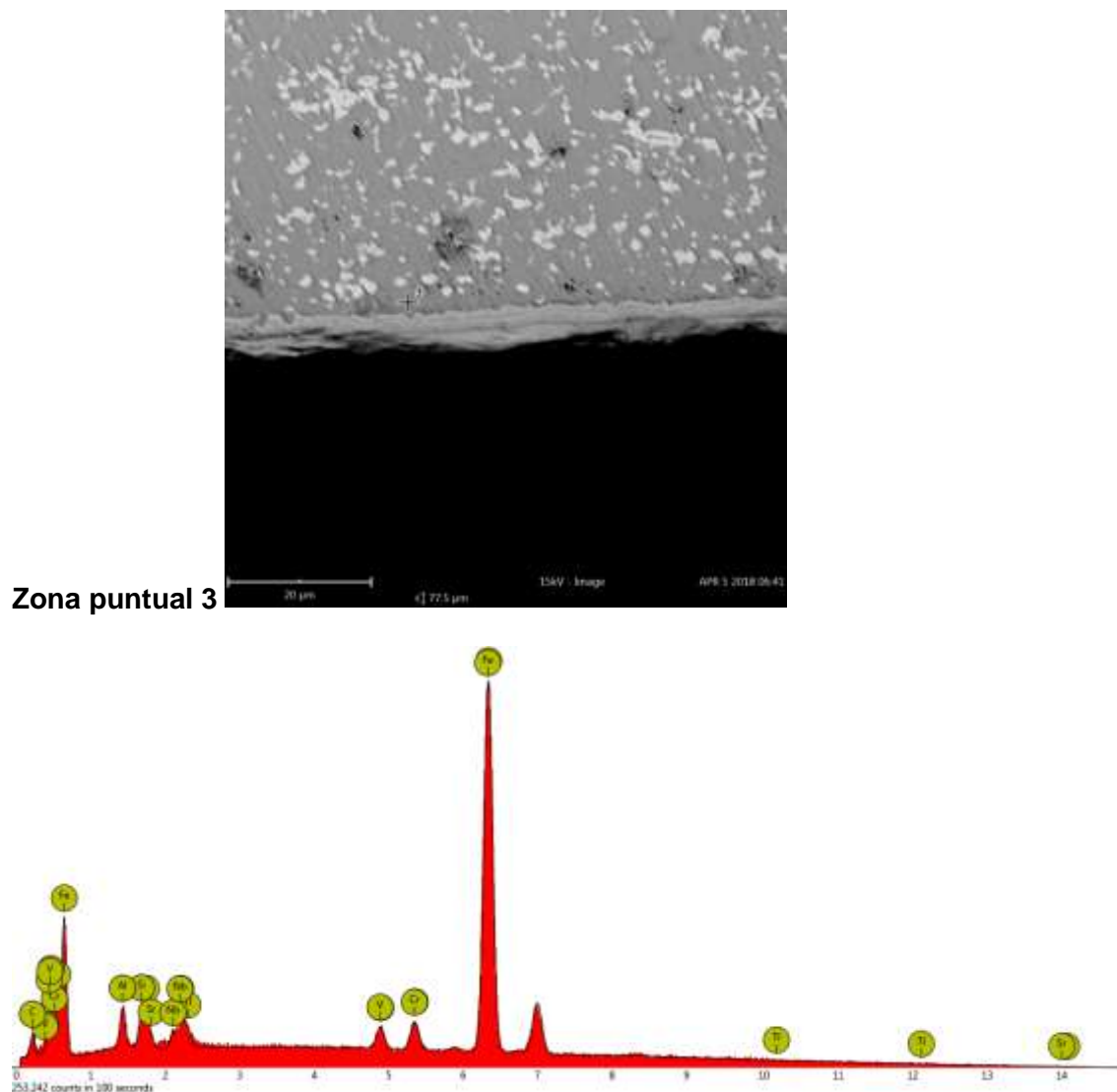


Ilustración A-4. Detalle de la zona puntual 3: a) micrografía MEB y b) espectro de elementos

Tabla A-3. Elementos de la zona puntual 3 - sección transversal

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
26	Fe	Hierro	58.8	0.0
8	O	Oxígeno	23.7	0.4
38	Sr	Estroncio	1.7	0.1
14	Si	Silicio	2.6	0.2
24	Cr	Cromo	2.5	0.3
81	Tl	Talio	1.5	0.6
13	Al	Aluminio	4.3	0.1
23	V	Vanadio	1.9	0.2
41	Nb	Niobio	0.9	0.6

6	C	Carbono	2.1	1.1
---	---	---------	-----	-----

Zona puntual 4

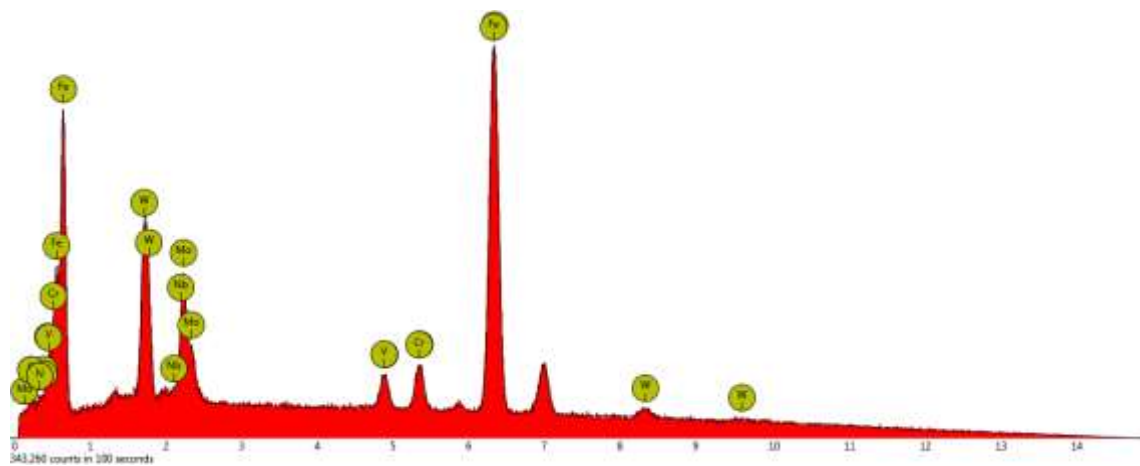


Ilustración A-5. Detalle de la zona puntual 4: a) micrografía MEB y b) espectro de elementos

Tabla A-4. Elementos de la zona puntual 4 - sección transversal

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
26	Fe	Hierro	68.3	0.1
42	Mo	Molibdeno	8.5	0.1
24	Cr	Cromo	4.5	0.3
23	V	Vanadio	3.6	0.1
41	Nb	Niobio	0.9	0.2
6	C	Carbono	3.1	0.5
74	W	Tungsteno	3.8	0.9
7	N	Nitrógeno	7.3	2.2

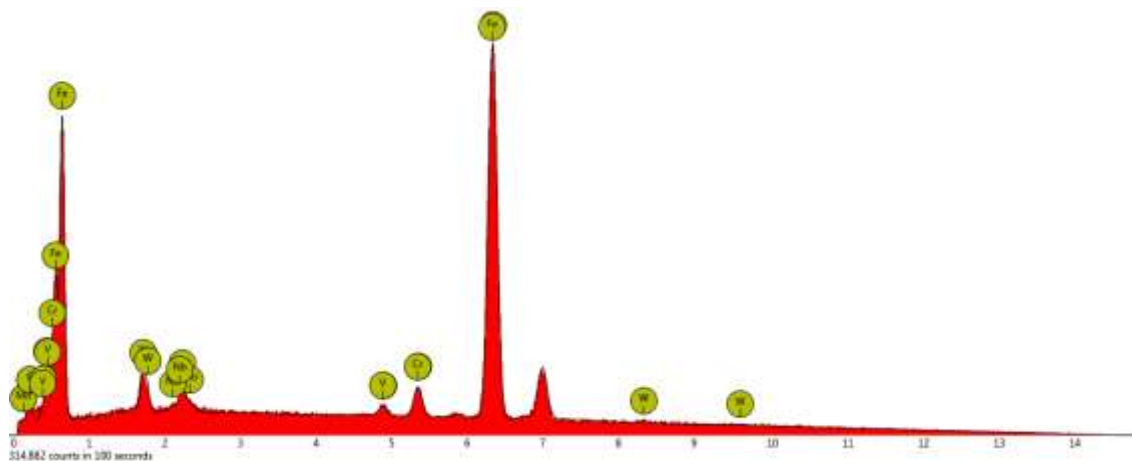
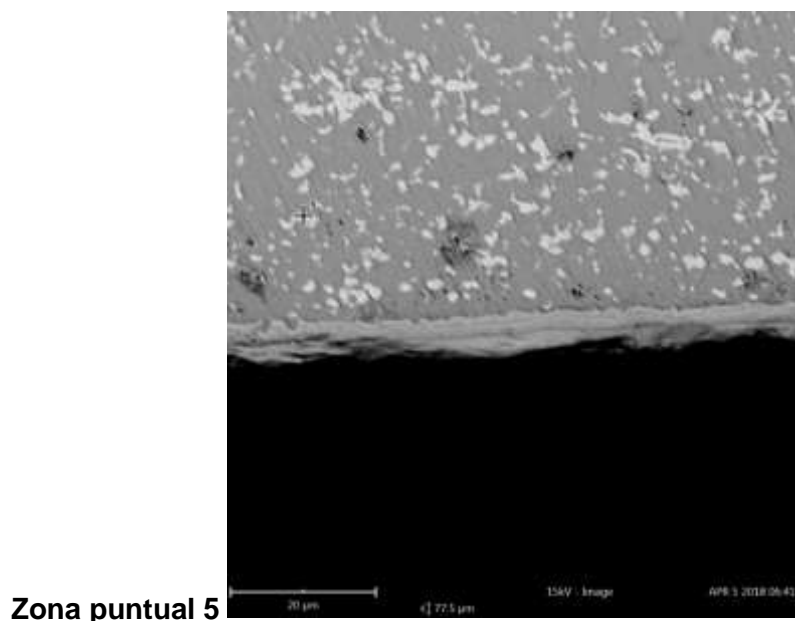


Ilustración A-6. Detalle de la zona puntual 5: a) micrografía MEB y b) espectro de elementos

Tabla A-5. Elementos de la zona puntual 5 - sección transversal

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
26	Fe	Hierro	88.3	0.1
24	Cr	Cromo	3.7	0.1
42	Mo	Molibdeno	2.2	0.7
6	C	Carbono	2.9	0.7
23	V	Vanadio	1.2	0.1
41	Nb	Niobio	0.8	0.4
74	W	Tungsteno	0.9	1.2

Resultados EDS capa superficial

Resultados de análisis por EDS en equipo MEB (Universidad ECCI). Se muestra una cantidad de 4 zonas puntuales en el recubrimiento superficial de carburo de niobio (NbC) y carburo de vanadio (VC) sobre un acero herramienta M2 por la técnica TRD. Se aplica la mezcla de un 8% de ferroniobio y 8% de ferrovanadio 4 horas en 1050°C.

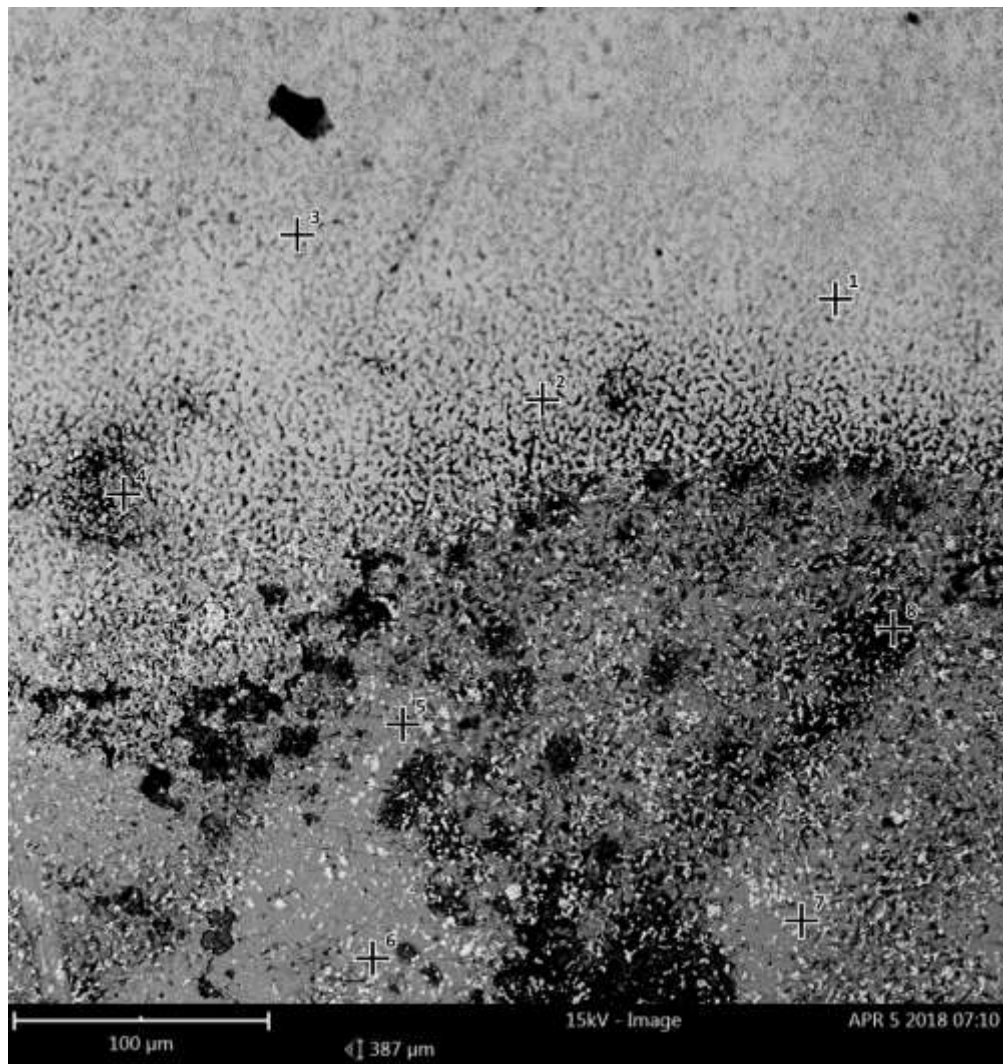


Ilustración A-7 Nb-V-4h –EDS en zonas puntuales – capa superficial

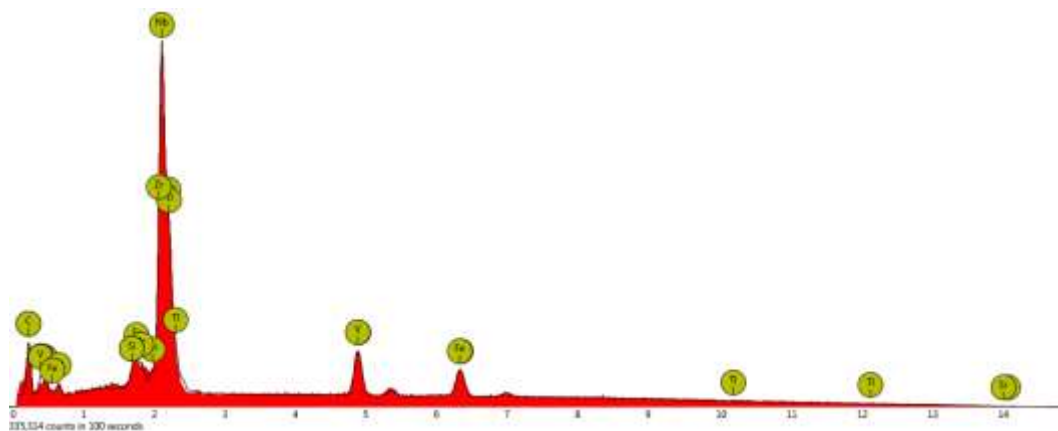
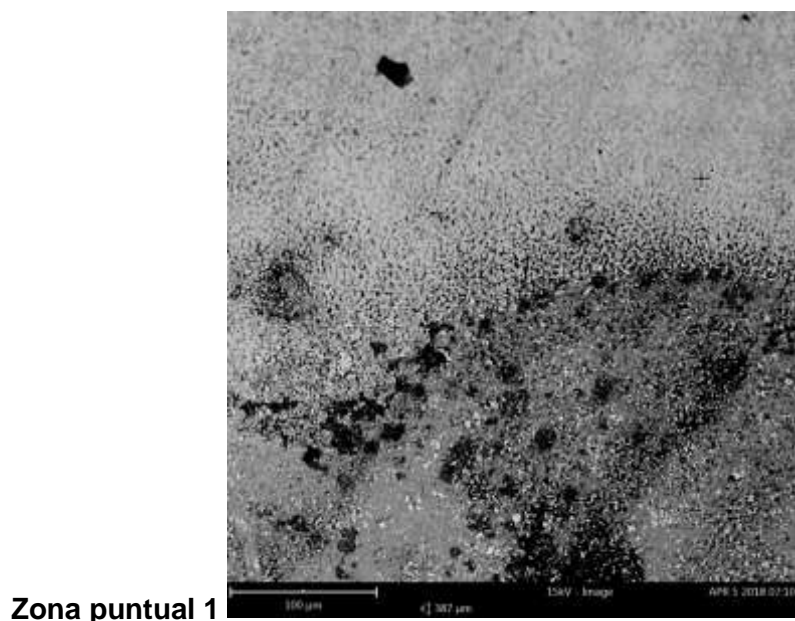


Ilustración A-8. Detalle de la zona puntual 1: a) micrografía MEB y b) espectro de elementos

Tabla A-6. Elementos de la zona puntual 1 - capa superficial

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
41	Nb	Niobio	43.6	0.0
81	Ti	Talio	3.2	0.0
23	V	Vanadio	11.6	0.1
40	Zr	Zirconio	2.2	0.0
26	Fe	Hierro	10.5	0.1
38	Sr	Estroncio	3.0	0.0
6	C	Carbono	24.0	1.0

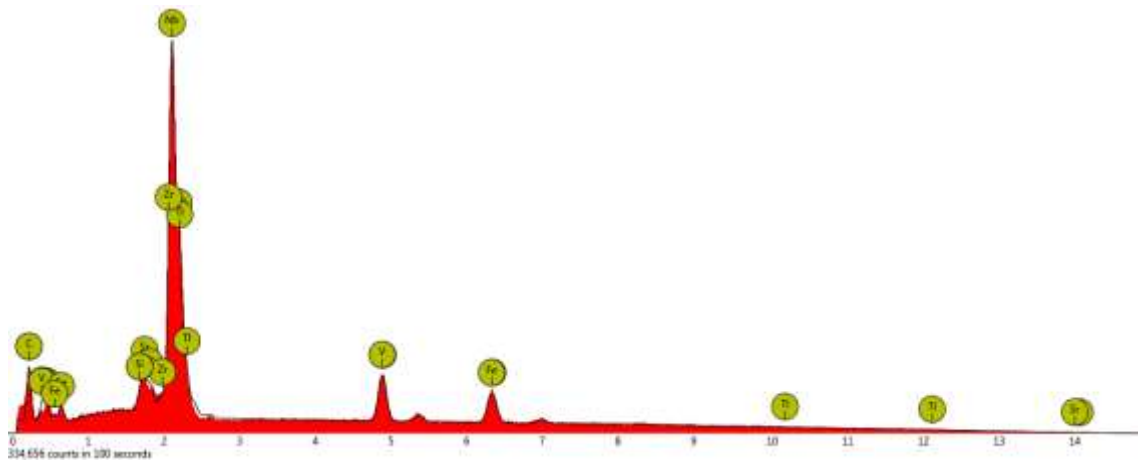
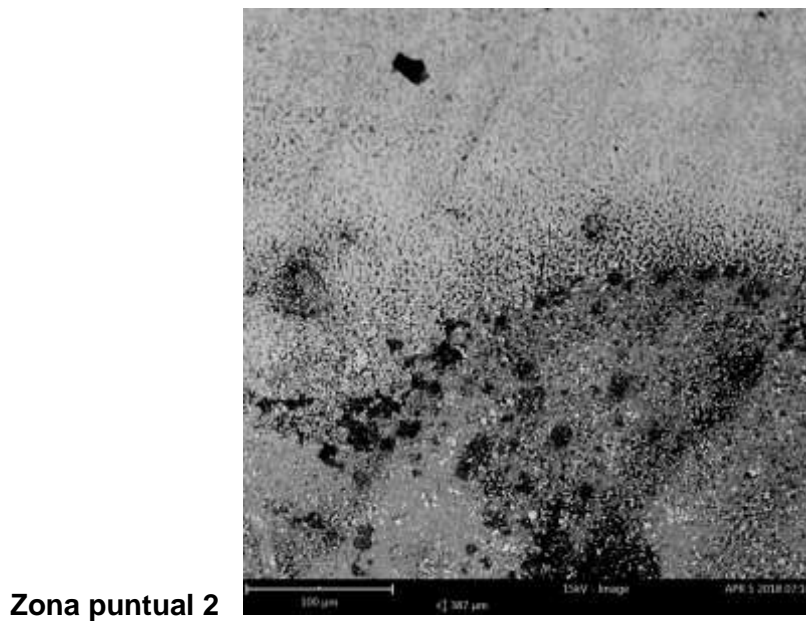


Ilustración A-9. Detalle de la zona puntual 2: a) micrografía MEB y b) espectro de elementos

Tabla A-7. Elementos de la zona puntual 2 - capa superficial

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
41	Nb	Niobio	43.7	0.0
81	Tl	Talio	2.9	0.0
23	V	Vanadio	11.3	0.0
26	Fe	Hierro	11.1	0.1
38	Sr	Estroncio	3.4	0.0
40	Zr	Zirconio	1.9	0.0
6	C	Carbono	23.5	1.1
14	Si	Silicio	2.2	0.4

Zona puntual 3

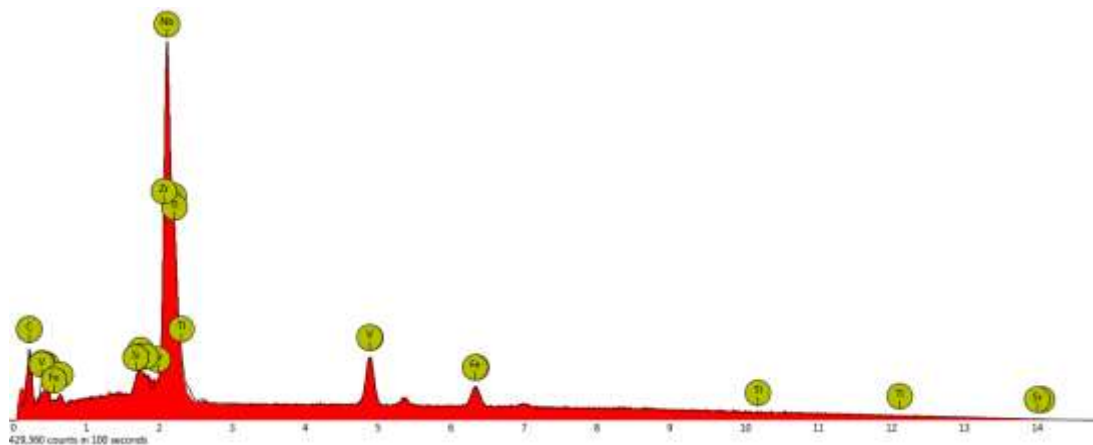
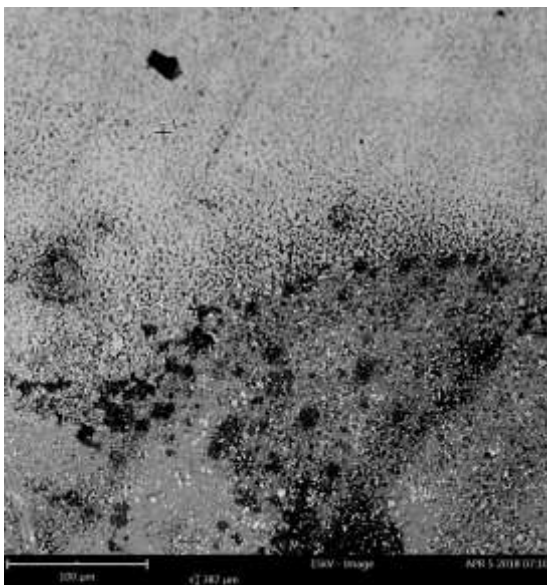


Ilustración A-10. Detalle de la zona puntual 3: a) micrografía MEB y b) espectro de elementos

Tabla A-8. Elementos de la zona puntual 3 - capa superficial

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
41	Nb	Niobio	44.3	0.0
81	Tl	Talio	2.9	0.0
23	V	Vanadio	12.6	0.0
6	C	Carbono	26.0	1.0
40	Zr	Zirconio	1.9	0.0
38	Sr	Estroncio	2.7	0.0
26	Fe	Hierro	8.0	0.1
14	Si	Silicio	1.7	0.4

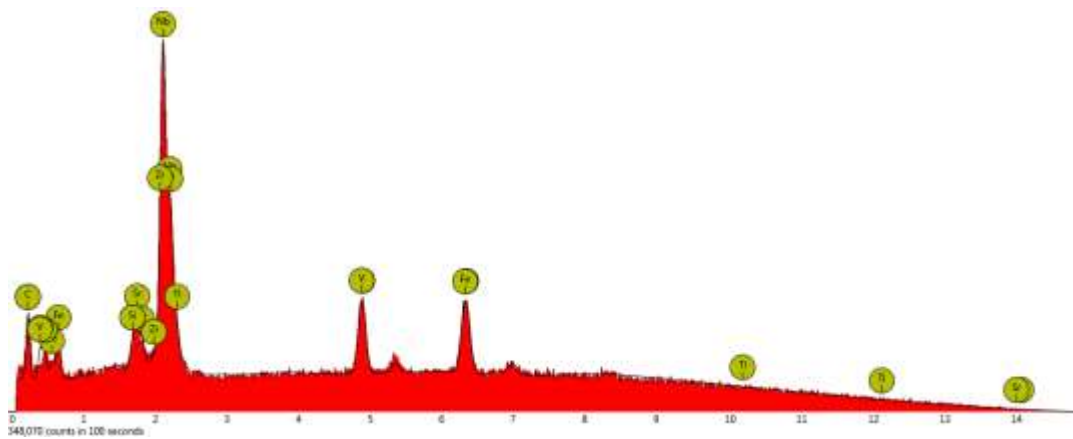
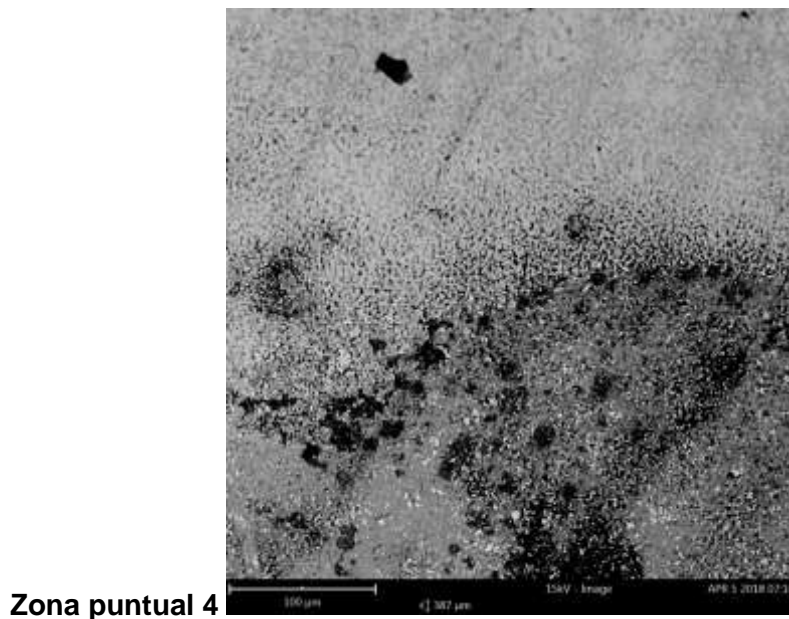


Ilustración A-11.Detalle de la zona puntual 4: a) micrografía MEB y b) espectro de elementos

Tabla A-9. Elementos de la zona puntual 4 - capa superficial

Número	Símbolo	Nombre	Concentración atómica	Error
41	Nb	Niobio	32.8	0.0
81	Ti	Talio	3.3	0.0
26	Fe	Hierro	22.1	0.1
23	V	Vanadio	14.5	0.2
38	Sr	Estroncio	3.7	0.1
6	C	Carbono	19.6	0.6
40	Zr	Zirconio	1.7	0.0
14	Si	Silicio	2.3	0.4

Condición de mediciones DRX recubrimientos NbC-VC revenido 10 minutos del software High-Score Plus

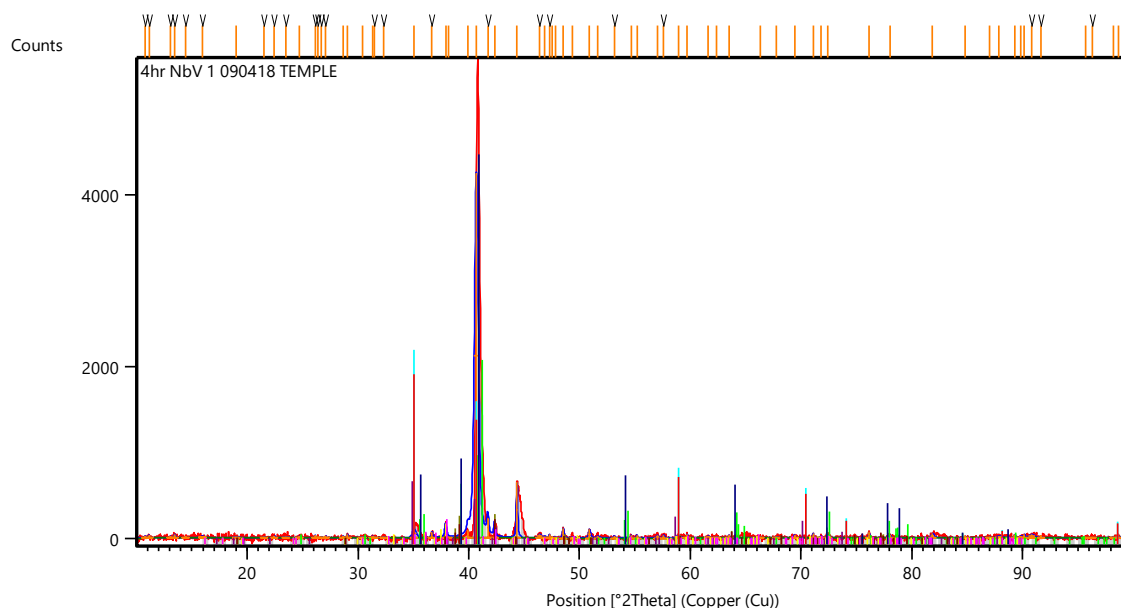


Ilustración A-12. Espectro EDS de capa superficial NbC-VC 10 minutos de revenido

Tabla A-10. Identificación de patrones 10 minutos de revenido

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	03-065-8783	0	Niobium Carbide	0,000	0,391	Nb C
*	03-065-2628	4	Vanadium Carbide	0,000	0,370	V ₂ C
*	01-077-0988	4	Niobium Carbide	0,000	0,030	Nb ₂ C
*	03-065-8781	0	Niobium Carbide	0,000	0,340	Nb C
*	00-024-1390	3	Vanadium Carbide	0,000	0,039	V ₄ C _{2.67}
*	01-073-1320	3	Vanadium Carbide	0,000	0,797	V ₂ C

**Reporte Condicion de mediciones DRX recubrimientos
NbC-VC revenido 1 hora del software highScore Plus**

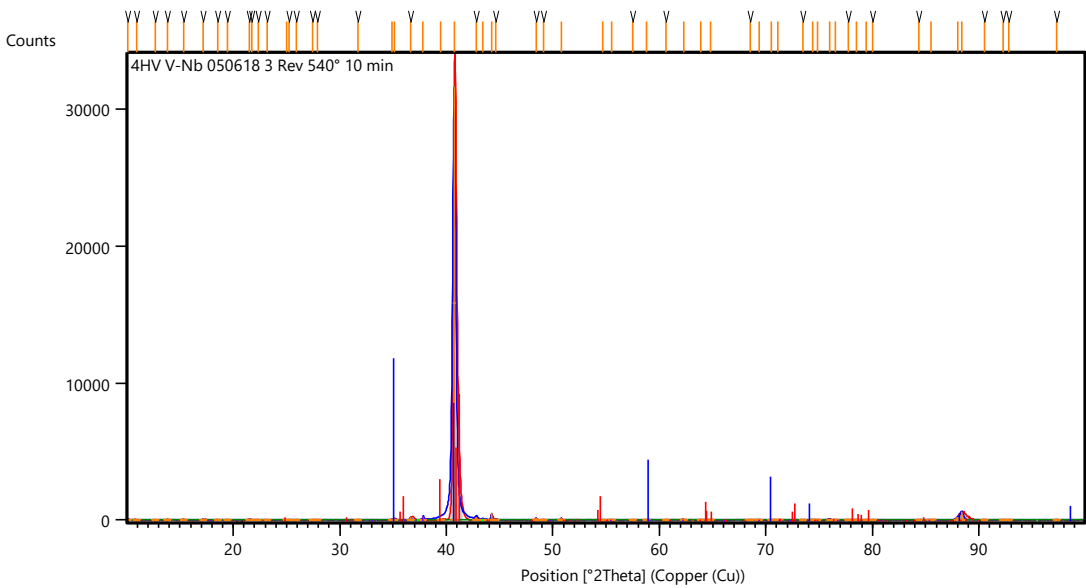


Ilustración A-13. Espectro EDS de capa superficial NbC-VC 1 hora de revenido

Tabla A-10. Identificación de patrones 1 hora de revenido

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displaceme nt [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	03-065- 8783	9	Niobium Carbide	0,000	0,345	Nb C
*	03-065- 8074	1	Vanadium Carbide	0,000	0,002	V C
*	01-071- 1258	4	Vanadium Carbide	0,000	0,269	V2 C
*	01-089- 3015	6	Niobium Carbide	0,000	0,008	Nb2 C

Anexo B.

Procedimiento de ensayo de microdureza vickers

Como equipo de medición de dureza, se empleó un microdurómetro Vickers, Tipo M N°73545, marca SHIMADZU. Por medio de porta muestras de sujeción de roscado, se realizaron pruebas de ensayo de microdureza como se observa en las tablas adjuntas y de acuerdo con la formula HV del ASTM E92. Se realizan datos de medición en diagonal del indentador al designar una fuerza de 25 gr durante 15 segundos. Se da como resultado un promedio microdureza de la sección transversal de la capa y el sustrato de acero herramienta M2 con diferentes revenidos (10 minutos y 1 hora):

Tabla B-1.Capa de NbC-VC Revenido por 10 min

DIAGONAL 1 (µm)	DIAGONAL 2 (µm)	Promedio Diagonal (µm)	Dureza Vickers (HV)	Dureza HRC
4,3	4,5	4,4	2395	484
4,3	5,5	4,9	1931	226
4,5	5,5	5	1854	198
4	4,9	4,45	2341	445
5,5	4,2	4,85	1971	242
4	5,1	4,55	2239	378

Dureza Promedio Capa TRD (HV)
2103

Tabla B-2.SUSTRATO (revenido por 10 minutos)

	Longitud después de la capa (µm)	DIAGONA L 1 (µm)	DIAGONAL 2 (µm)	Promedio Diagonal (µm)	Dureza Vickers (HV)	Dureza HRC
Sustrato	5	8	6	7	946	69
	15	7,7	8,5	8,1	707	60
	40	9,8	9,1	9,45	519	51
	60	8,5	7,5	8	724	61
	80	8,5	8,3	8,4	657	58

Dureza Promedio Sustrato (HV)
711

Tabla B-3.Capa de NbC-VC 1er rev 540°C por 1 hora

DIAGONAL 1 (μm)	DIAGONAL 2 (μm)	Promedio Diagonal (μm)	Dureza Vickers (HV)	Dureza HRC
7,5	7	7,25	882	66
8,1	6,5	7,3	870	66
7,6	6	6,8	1003	71
8	7	7,5	824	65
7,5	8	7,75	772	63
6,6	8,5	7,55	813	64

Dureza Promedio Capa TRD (HV)
861

Tabla B-4.SUSTRATO (revenido por una hora)

	Longitud después de la capa (µm)	DIAGONAL 1 (µm)	DIAGONAL 2 (µm)	Promedio Diagonal (µm)	Dureza Vickers (HV)	Dureza HRC
Sustrato	5	9,6	10	9,8	483	48
	15	9,4	10,5	9,95	468	47
	40	9,4	9,5	9,45	519	51
	60	9,6	10,5	10,05	459	46
	80	10	9,5	9,75	488	48
Dureza Promedio Sustrato (HV)						
483						

Anexo C

Morfología de insertos posterior al mecanizado

Se evalúa desgaste en micrografía por MEB de insertos por recubrimientos duros por deposición termoreactiva y análisis de composición química de los elementos presentes en el área desgastada.

El desgaste de mecanizados a material de trabajo de acero AISI 4140 se ilustra en micrografías secundarias y retrodispersadas MEB Tescan Vega 3 (**ilustración C 1-8**), de insertos de corte con recubrimiento duros pos TRD de carburo de NbC-VC con revenido a 10 minutos (Grupo N1) y revenido a 1 hora (grupo N4) (Tabla 2-5), lo cual determina el tipo de desgaste en el análisis EDS de los siguientes insertos posterior al maquinado:

**Inserto de NbC-VC N4, con velocidad de corte 30 m/min maquinando acero 4140 A)
Desgaste del flanco y muesca 200X B) análisis EDS.**

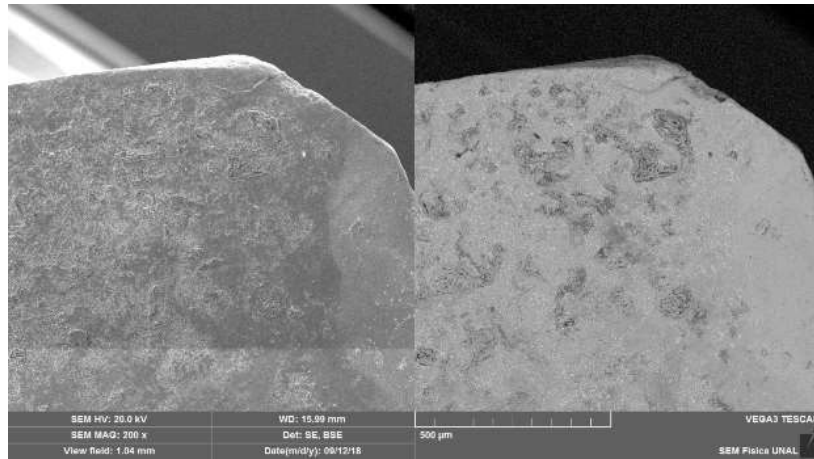


Ilustración C-1 Micrografía Inserto grupo N4 velocidad de corte 30 m/min maquinando acero 4140

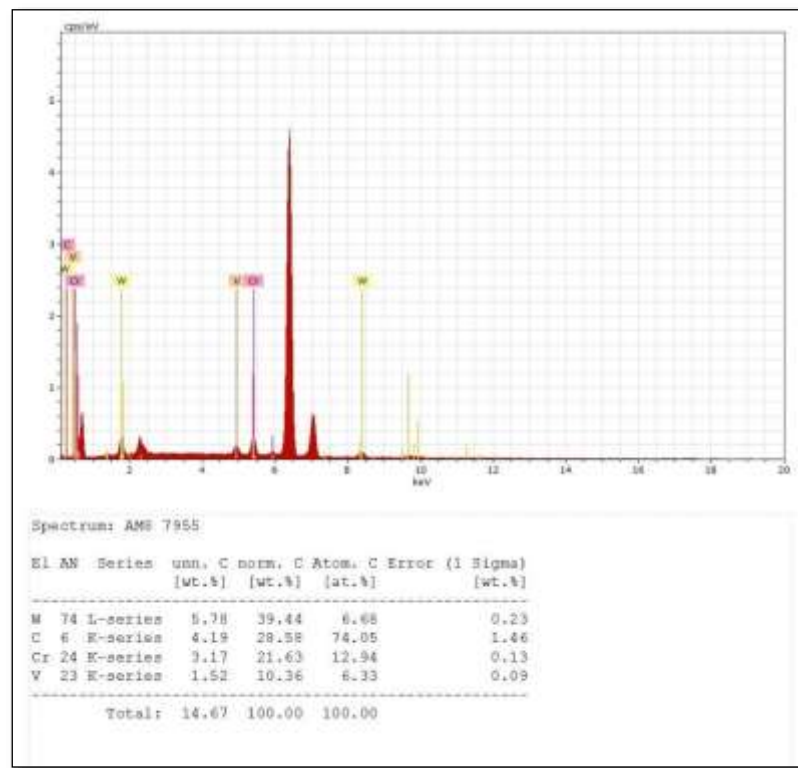


Ilustración C-2. Espectro Inserto grupo N4 de elementos con tabla de porcentajes de composición.

Inserto de corte NbC-VC N4 -Vc 60 m/min A) 200X B) 660 X C) 1900X desgaste de muesca D) análisis EDS.

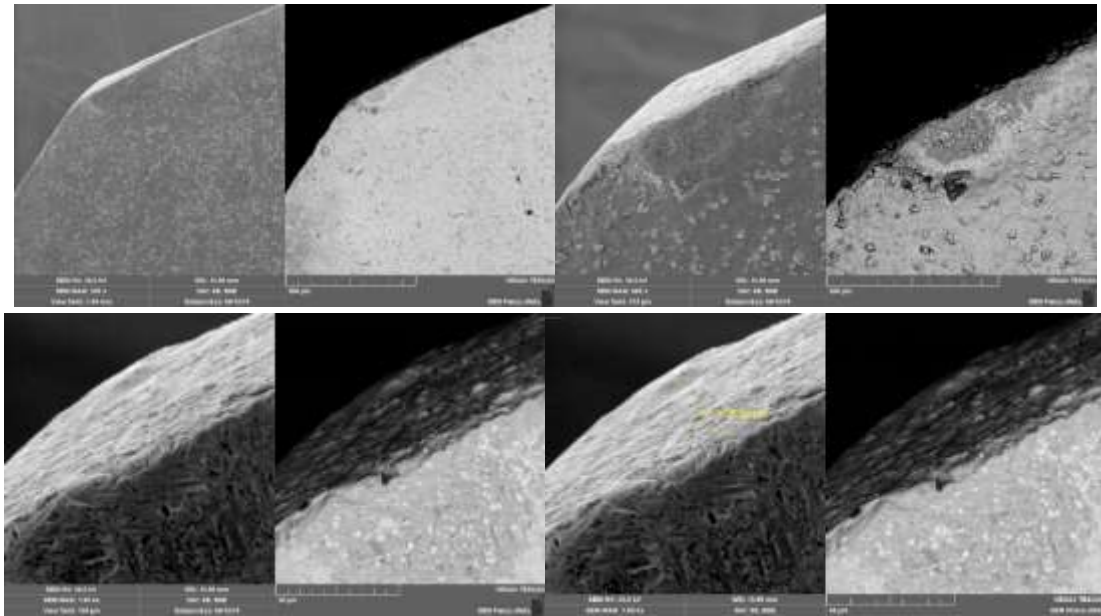


Ilustración C-3. Micrografía Inserto grupo N4 con Vc 60 m/min maquinando acero 4140.

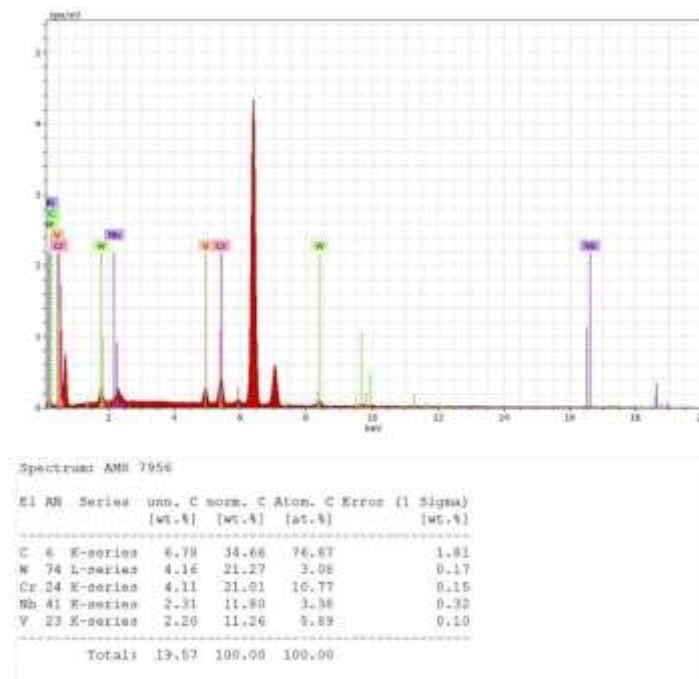


Ilustración C-4. Espectro Inserto N4 de elementos con tabla de porcentajes de composición.

Inserto de corte NbC-VC con Vc 60m/min a) desgaste por astillamiento y muesca 200X b) 660 X c) capa NbC-VC 1900X d) análisis EDS de la capa

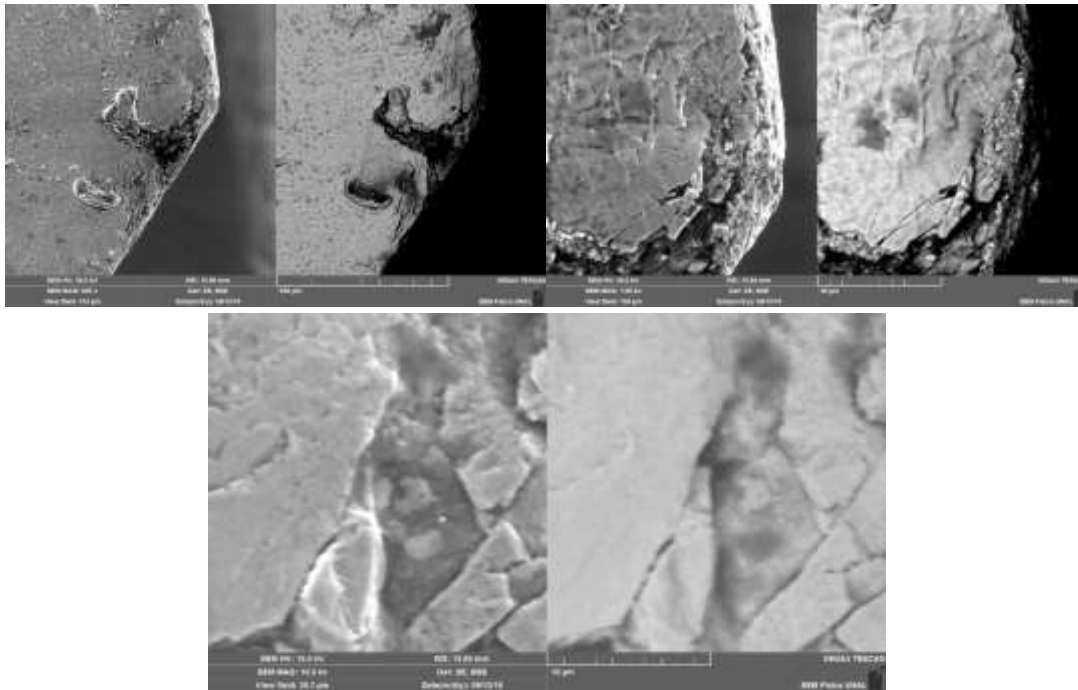


Ilustración C-5. Micrografía Inserto grupo N1, Vc 60 m/min maquinando acero 4140.

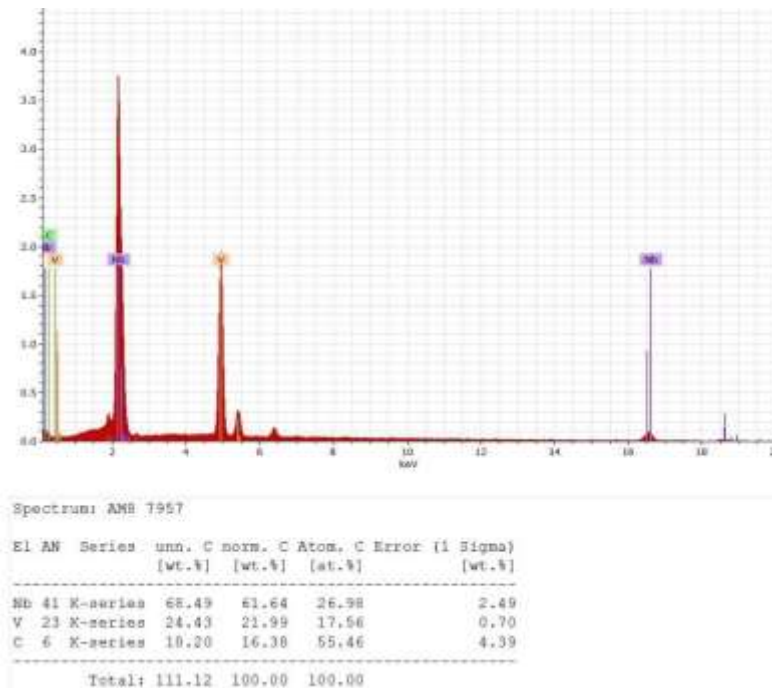


Ilustración C-6. Espectro Inserto grupo N1 de elementos con tabla de porcentajes de composición.

Inserto de corte NbC-VC N1 esquina 2 Vc 30m/min A)200X B)desgaste filo recrecido (BUE) y desgaste de flanco 660 X, C) zona puntual A capa NbC-VC 1900X por D) análisis EDS.

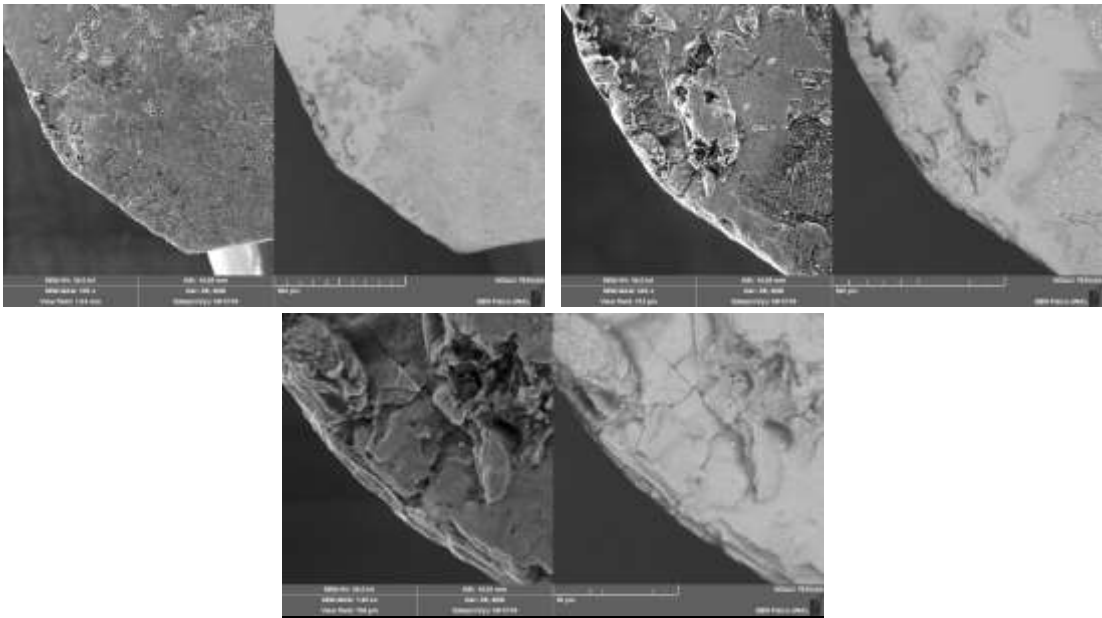


Ilustración C-7. Micrografía Inserto grupo N1 con Vc 30 m/min maquinando acero 4140.

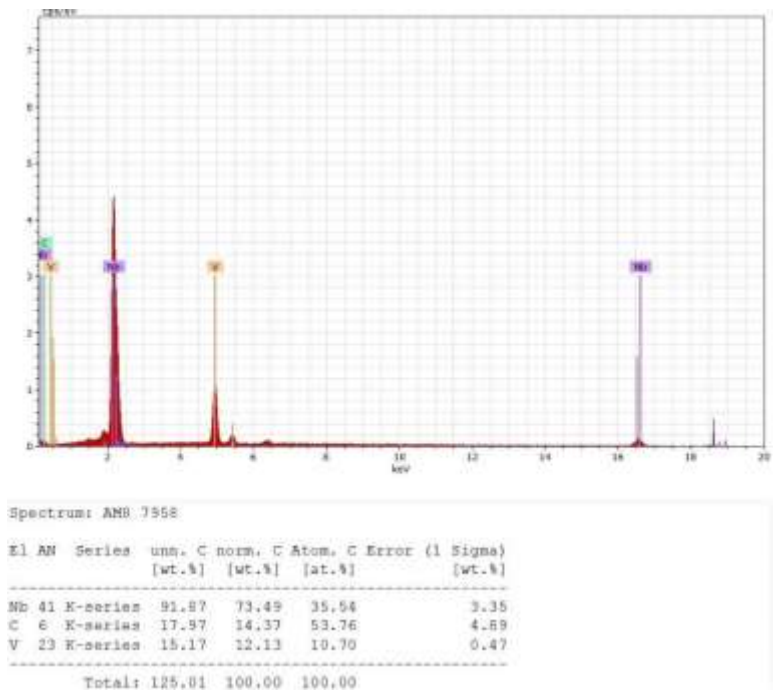


Ilustración C-8. Espectro Inserto N1 de elementos con tabla de porcentajes de composición.

Anexo D Contribución de póster-ponencia

Sociedad Mexicana de Ciencia
y Tecnología de Superficies y Materiales A.C.



XI

International Conference
on Surfaces, Materials
and Vacuum 2018
24 -28 September 2018, Riviera Maya, México

The Conference Organizing Committee certifies that

J.H. Martinez, J. J. Olaya, J. F. Obando

presented the following oral contribution

52-THF

"Machining of VC and NbC coatings deposited via TRD"

Dr. Gregorio Hernández Cocolletzi
President SMCTSM

Machining of VC and NbC coatings deposited via TRD

J.H. Martinez⁽¹⁾, J. J. Olaya⁽¹⁾, J.F. Obando⁽²⁾,

⁽¹⁾ Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Bogotá, Colombia.

⁽²⁾ Departamento de Ciencias Naturales, Universidad Central, Bogotá, Colombia.

Corresponding author: jhmartineza@unal.edu.co



XI International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum

ABSTRACT

In this work was deposited vanadium carbide (VC) and niobium carbide (NbC) coatings by thermo-reactive deposition/diffusion (TRD) on tool steel substrates. The chemical composition analysis was performed using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and structural analysis was performed by X-ray diffraction (XRD). The mechanical properties was evaluated by microhardness test. The morphology of the layer was characterized by scanning electron microscopy (SEM). Overall, the results show that the coatings deposited improved the durability of the substrate. The influence cutting speed, feed rate and depth of cut on various machinability characteristics be discussed in this work.

EXPERIMENTAL DETAILS

- The cutting inserts are designed and manufactured in pure AISI M2 steel tool, using machine tools such universal milling and universal sharpening with their respective assemblies and devices to then perform its hard coating by TRD.
- The geometries of cutting inserts were: $IC=12.7\text{ mm}$, $IL=12.7\text{ mm}$, $S=3.18\text{ mm}$, $a=1\text{ mm}$, $R=1.5\text{ mm}$ (figure 1), manufactured were heated before the TRD treatment at 600°C to avoid thermal stress. The niobium, vanadium carbides on the inserts were produced using the TRD technique in a mixture composed of 81%borax pentahydrate, 6% ferromniobium, 8% ferrovandium and 3% aluminum at 1050°C for 4 hours, in a industrial electric resistance furnace ABAREPHOR Model 1200-110 quenching was performed in oil at room temperature after the TRD process and finally the treated pieces were subjected to tempering at 550°C for 10,60 minutes.
- The coating produced were characterized for phase formations and crystallographic orientation using X-ray diffraction (XRD) technique. In an Panalytical XPert PRO diffractometer with Cu-K α radiation ($\lambda = 0.154\text{ nm}$). The diffractograms were acquired using Bragg-Brentano (θ - 2θ) geometry, for a 2θ range from 35° to 100° .
- The thickness of the coatings produced was measured using a Scanning Electron Microscopy (SEM) Vega 3 SEM. Vickers micro-hardness was measured using an Shimadzu type M No 73545 micro hardness tester at a load of 25 gf. and 20 s de well time. The reported values are the average of 6 reading in layer of the coating cross section.
- The cutting performance of the coated NbVC inserts was evaluated by coolant cutting test on a Fadal VMC15 CNC vertical Machining center equipped face milling cutter for the inserts of TRD. The cutting conditions used during machining operations were: constant depth of cut $a_p = 0.3\text{ mm}$, variable cutting speed $v = 20\text{--}60\text{ m/min}$. The maximum flank wear VB_{max} was measured using measuring machine for tool Zeiss Smile 400 after each cutting process.
- The surface morphology and chemical composition of the worn rake face and flank face of the cutting tools were examined by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive - ray spectroscopy (EDS).

RESULTS AND DISCUSSION



Figure 1. Design and manufacture of insert for coating

Table 1. EDS composition analysis elements in the coating of NbVC

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Concentration	Error
41	Nb	Niobium	39.5	0.0
23	V	Vanadium	25.9	0.1
26	Fe	Iron	20.2	0.1
67	Pm	Praseodymium	1.5	0.1
6	C	Carbon	12.9	0.8



Figure 2. Typical descriptive diagram of temperature versus time of a deposit process by TRD



Figure 3. SEM micrographs for the cross section of the coating produced on insert de NbVC.

RESULTS AND DISCUSSION

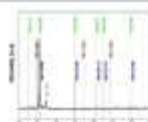


Figure 4. XRD patterns of the carbide coating produced on AISI M2.



Figure 5. Assembly of inserts by TRD in milling machine CNC VMC 15.



Figure 6. SEM micrographs on the worn rake face of coated insert after 100 mm cutting at the speed of 40 m/min and EDS composition analysis in point A of insert worn rake face

Table 2. comparison of milling inserts flank wear experiment values.

Insert	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	F ₃ (mm)	F ₄ (mm)	F ₅ (mm)
1	20	0.5	80	25	0.08
2	30	0.5	75	120	0.120
3	40	0.5	100	167	0.168
4	60	0.5	150	250	0.247

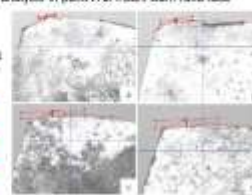


Figure 4. worn flank of insert cutting at the speed of (a. 20m/min b.) 30m/min c) 40m/min d. 50 m/min

CONCLUSION

- SEM micrographs of the cross-section of the coatings produced on the inserts of cutting. Homogeneous coating were obtained with $4.5 \pm 0.3\text{ }\mu\text{m}$ and $9.78 \pm 0.3\text{ }\mu\text{m}$ thicknesses.
- The hardness values measured for the inserts produced were $1802 \pm 100\text{ Hv}$. The microhardness values obtained are in the range those reported in binary and ternary carbides.
- The analysis of EDS composition showed the presence of the elements of Niobium, Vanadium present in the hard coating.
- From these results the presence of niobium carbide (NbC- ICSD 01-074-1222), vanadium carbide (VC- ICSD 01-071-1258) is confirmed for the inserts cutting, crystallographic planes are observed in orientations $\{111\}$, $\{200\}$, $\{111\}$, $\{220\}$ with crystal cubic system (Fm3m).
- Tool wear took place due to abrasive rake face wear combined with severe plastic deformation and chipping of cutting edge according parameters of cutting. Also was detected particularly when coating was removed from substrate. Better performance of the cutting in the parameter of 20 m/min and less wear on the rake face was obtained.

Acknowledgments

- Loan services equipment of thermal treatment laboratories Incca University of Colombia and National University of Colombia, in the development of this research project.

Anexo E: Publicación Artículo

Se realizó proceso de publicación del siguiente artículo: "Desempeño de corte a insertos recubiertos de carburos binarios de niobio – vanadio obtenidos por deposición/difusión termoreactiva (TRD)" para la Revista ciencia e ingeniería **Neogranadina**.

Desempeño de corte a insertos recubiertos de carburos binarios de niobio-vanadio obtenidos por deposición/difusión termoreactiva (TRD)

Cutting performance to inserts coated with binary niobium–vanadium carbides obtained by thermoreactive deposition/diffusion technique (TRD)

Jose Helmer Martinez Aidana¹

Ingeniero Mecánico, estudiante maestría Ingeniería Mecánica

Universidad Nacional de Colombia

Bogotá, Colombia

Jhmartinezanal.edu.co

Jhon Jairo Olaya Florez²

Doctorado en materiales, Profesor titular facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Colombia

Bogotá, Colombia

jolaya@unal.edu.co

Johnny Franklin Obando Baquero³

Maestría en materiales y procesos, Docente, Departamento de ciencias naturales

Universidad Central

Bogotá, Colombia

Jobandob1@uocentra.edu.co

RESUMEN

Los recubrimientos de carburos de niobio y vanadio producidos mediante la técnica de deposición por difusión termoreactiva (TRD) tienen excelentes propiedades mecánicas para ser usados en insertos de corte de acero para herramientas. Por esto, en este trabajo, se produjeron recubrimientos binarios de NbC-VC, mediante la técnica de TRD sobre insertos de acero AISI M2 para mejorar el desempeño de corte en el maquinado y evaluar su condición de corte a insertos sin recubrir. Los recubrimientos fueron caracterizados mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) y microscopia electrónica por barrido (SEM), con el fin de estudiar la formación de fases-estructura cristalina, la composición química y la

morfología del recubrimiento. El desempeño de los insertos recubiertos y sin recubrir, se evaluó por medio de condiciones de velocidad de corte (V_c) por fresado de 20, 30,40 y 60 m/min con el maquinado de platinas de acero AISI 4140. Los resultados por DRX mostraron la formación de carburos de niobio-vanadio con una estructura FCC. Mediante SEM, se observó una morfología con granos equiaxados y columnares. La microdureza $HV_{0.25}$ promedio del recubrimiento fue de 2103 Vickers.

Los resultados de estos recubrimientos mejoran la resistencia al desgaste de los insertos y desempeño del maquinado, en comparación de las mismas condiciones de corte a insertos sin recubrir. La técnica TRD de NbC-VC es una alternativa de recubrimientos duros en mejorar herramientas de corte por su bajo costo y eficiente desempeño para campos del sector industrial y metalmeccánico.

Palabras clave: TRD, recubrimientos duros, carburo de niobio, carburo de vanadio, herramienta de corte, desgaste de herramientas.

ABSTRACT

The coatings of niobium and vanadium carbides produced by the thermoreactive diffusion deposition (TRD) technique have excellent mechanical properties to be used in tool steel cutting inserts. Therefore, in this work, binary NbC-VC coatings were produced, using the TRD technique on AISI M2 steel inserts to improve the cutting performance in the machining and evaluate its cutting condition to uncoated inserts. The coatings were characterized by X-ray diffraction (XRD), dispersive energy X-ray spectroscopy (EDS) and scanning electron microscopy (SEM), in order to study the formation of crystalline phases-structure, chemical composition and coating morphology. The performance of the coated and uncoated inserts was evaluated by means of cutting speed conditions (V_c) by milling of 20, 30.40 and 60 m / min with the machining of AISI 4140 steel plates. The results by DRX showed the formation of niobium-vanadium carbides with an FCC structure. Through SEM, a morphology with equiaxed and columnar grains was observed. The average $HV_{0.25}$ microhardness of the coating was 2103 Vickers.

The results of these coatings improve the wear resistance of the inserts and machining performance, compared to the same cutting conditions to uncoated inserts. The TRD technique of NbC-VC is an alternative of hard coatings in improving cutting tools due to its low cost and efficient performance for industrial and metalworking fields.

Keywords: TRD, hard coatings, niobium carbide, vanadium carbide, cutting tool, tool wear.

INTRODUCCIÓN

Las empresas de maquinado de metal enfrentan el reto de cambiar variables de corte en pro de obtener una mejor superficie y alargar la vida útil del inserto, para aumentar la productividad del mecanizado [1]. Varias investigaciones despliegan mejoras en recubrimientos y geometría [2] con el desarrollo de nuevas herramientas. Sin embargo, en el tema de materiales de sustrato en acero para herramientas hay todavía mucho que investigar. Diferentes técnicas en recubrimientos, como la pulverización catódica o el magnetrón, realizan capas de nitruros y carburos [3],[4], en las que se evalúa también el maquinado en procesos de recubrimiento por deposición física de vapor (PVD) y deposición química de vapor (CVD) [5],[6] con el fin de optimizar sus características y condiciones de corte.

El método de deposición por difusión termoreactiva (TRD) en la producción de recubrimientos duros iniciado por Thoru Arai [7] es de interés por la facilidad del proceso, poca inversión y eficaz desempeño. El estudio de [8] realizó la evaluación de propiedades mecánicas con contenidos de VC depositados sobre aceros AISI H13 y AISI D2, a fin de estudiar el desempeño tribológico con diferentes porcentajes de ferrovanadio. Esto reveló que el crecimiento de este carburo de vanadio sobre acero AISI D2 es más compacto que con el acero AISI H13. En ensayos de dureza, se estableció que con el incremento de VC, disminuye su coeficiente de fricción [8]. Por otro lado, en la deposición de carburos binarios de niobio-cromo sobre sustratos de acero AISI D2, se ha estudiado en [9] el desgaste y resistencia a la corrosión. Los autores obtuvieron una alta resistencia al desgaste mayor y alta dureza de 27.62 ± 2.56 Gpa, aunque la resistencia a la corrosión fue menor con estos recubrimientos.

Existen varias investigaciones sobre recubrimientos de carburo de vanadio (VC) y carburos de niobio (NbC). Por ejemplo, los autores de [10] estudiaron este tipo de recubrimiento sobre acero AISI D2, a temperatura de 1000°C durante 3 horas, el cual fue caracterizado por SEM y difracción de rayos X (DRX). Los autores obtuvieron un buen desempeño tribológico de alta adherencia por pruebas de rayado, donde se evidenciaron valores de carga crítica del orden de 55N, dureza superior a 23 Gpa y coeficiente de fricción de 0.05-1.

Estos resultados permiten recomendar la producción de recubrimientos sobre este acero. Otros autores en [11] estudiaron en este acero las tasas de crecimiento de la capa en función del tiempo y temperaturas de inmersión de 1223, 1293 y 1363 K para 2, 3, 4 y 5 horas. Se obtuvieron compuestos de NbC, VC y NbVC₂, con durezas de hasta 38Gpa, similar a materiales súper-duros para recubrimientos. Además, los autores demostraron resistencia al desgaste del sistema capa-sustrato. Finalmente, el estudio de [12] presenta recubrimientos de NbC y VC sobre acero AISI H13 por TRD a una temperatura de 1020°C durante cuatro horas. Se encontraron capas con buena regularidad de espesor, $9.98 \pm 0.26\text{ }\mu\text{m}$ y alta dureza a 2000HK, que mejoraron la resistencia a la corrosión, comparadas con un acero sin recubrir.

Se han estudiado con el proceso TRD recubrimientos sobre herramientas de corte y su desempeño. En los estudios de [13],[14], se estudiaron herramientas de punzonado en acero AISI D2 y herramientas de roscado con acero M2, depositando

recubrimientos de NbC a 1050°C por 4 horas. Los resultados muestran mejora en la resistencia al desgaste, en comparación con las mismas herramientas sin recubrir. También se ha estudiado la vida útil de herramientas de forjado con tratamientos superficiales con técnicas CVD, PVD y TRD. Estos recubrimientos delgados duros dan una alta resistencia al desgaste y la abrasión, y su modificación traerá beneficio a la industria [15].

En este trabajo de investigación, fueron depositados ferroelementos de niobio-vanadio sobre insertos fabricados de acero AISI M2, utilizando la técnica de deposición por difusión termoreactiva (TRD) con un tratamiento mayor a 4 horas para una óptima capa, mayor resistencia y mayor dureza. Se evaluó el desgaste del inserto maquinado[16] y se midió con insertos con tratamiento térmico de templado a 1050°C por cinco minutos y revenido. Esto se hace para la comparación de su vida útil con el maquinado de material de trabajo acero AISI 4140.

1. PROCESO EXPERIMENTAL

El material de sustrato usado fue acero AISI M2, cuya composición química se presenta en la Tabla-1. Para un eficaz maquinado se fabricaron insertos utilizando máquinas herramientas como fresadora universal, rectificadora y afiladora de herramientas. Las dimensiones de los insertos fabricados fueron 12.7 x12.7x 3.1 mm con geometría de la herramienta de corte; anchura en el chaflán en el vértice CWH= 1mm; ángulo de incidencia $\alpha_s = 14^\circ$; longitud del filo BS=1.5 mm y ángulo de filo $\beta = 15^\circ$, de acuerdo al modelo SPKN 1203 [17].

Tabla-1 Composición química del sustrato acero M2

Composición química acero AISI M2 % Wt					
C	Cr	Mn	V	W	Mo
0.87	3.4	0.27	1.9	6.11	4.8

Fuente: Elaboración propia.

Para evitar distorsiones, los insertos se calentaron antes del proceso TRD a una temperatura de 600°C. Los recubrimientos duros de carburo de niobio y vanadio se produjeron en una mezcla compuesta del 81% de bórax pentahidratado, 8% de ferroniobio, 8% de ferrovanadio y 3 % de aluminio a 1050°C durante 4 horas de tratamiento[13], en un horno refractario eléctrico. Luego del proceso TRD, se realizó enfriamiento en aceite a temperatura ambiente y finalmente se sometió a tratamiento por revenido a 540°C por 10 minutos. La figura 1 muestra el ciclo típico de recubrimientos por la técnica TRD.

En los tratamientos térmicos para aceros herramientas de M2 se realiza un precalentamiento, templado, enfriado en aceite o sales y revenido.[18],[19] Para los insertos sin recubrir se realiza un precalentamiento a 600°C por veinte minutos para posterior hacer el tratamiento de templado a 1050°C por cinco minutos. Se enfria en aceite para luego hacerle un revenido a 540°C por 10 minutos teniendo en cuenta la similitud de condiciones del proceso por TRD.

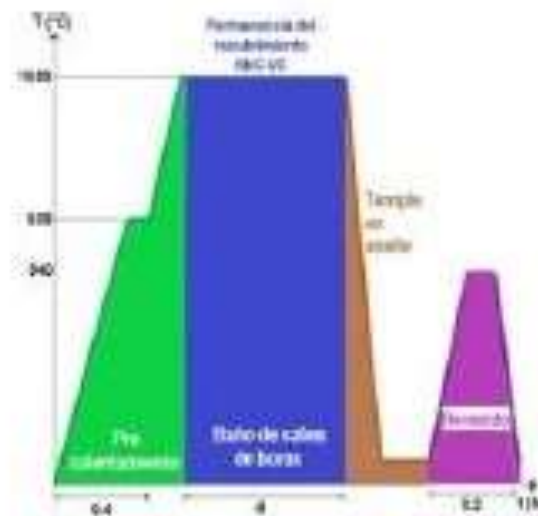


Figura 1 Proceso TRD con temperatura versus tiempo de formación del recubrimiento.

Los recubrimientos producidos por TRD fueron caracterizados por la formación de las fases y orientación cristalográfica, utilizando Difracción de rayos X (DRX) en un equipo X-pert Pro PANalytical con configuración θ - 2θ , variando de 30° a 90° , y radiación monocromática Cu K α ($\lambda=15409 \text{ \AA}$), 45kV, 40mA y un paso de tamaño 0.02° . Se analizó el recubrimiento en sección transversal del inserto de corte por microscopía electrónica de Barrido (SEM) y composición química por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) en zonas puntuales del recubrimiento superficial. La dureza fue medida en la capa en sección transversal, utilizando un microdurómetro Vickers Tipo M N°73545, marca SHIMADZU, empleando una carga de 25 g durante 15 segundos, reportando un promedio de 6 lecturas. Para la observación morfológica granular de la capa y la sección transversal, las muestras fueron atacadas con una solución acuosa al 10% de hidróxido de potasio (KOH) + 10% de ferrocianuro de potasio $K_3[Fe(CN)_6]$ + 100% H $_2$ O[20].

Los insertos recubiertos con carburos de NbC-VC fueron evaluados por pruebas de corte, maquinado con refrigerante sintético, en un centro de mecanizado CNC, referencia VMC 15S Fadal. Las condiciones de corte durante las operaciones de maquinado fueron: profundidad de corte constante $a_p=0.3\text{mm}$, variable de velocidad de corte $V_c=20, 30, 40$ y 60 m/min depende del avance por revolución $f_n=0.6 \text{ mm/rev}$ y el avance por diente $f_z=0.12 \text{ mm}$ obtenido del promedio de condiciones de maquinado de un inserto SPKN1203. Las piezas de material de trabajo a maquinar fueron acero AISI 4140, con dimensiones de platina $60 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ con espesor de 15mm .

De acuerdo con los experimentos donde se involucra el fresado de los insertos por TRD a variables de velocidad de corte luego de maquinado en materiales de trabajo, acero AISI 4140, es necesario obtener un valor en el flanco de corte. La evaluación de la vida útil de la herramienta de corte se estableció como el desgaste del flanco de corte (VB) al inserto, utilizando un equipo de medición de herramientas Smile 400 marca: Zoller.

La morfología de la superficie y composición química del flanco de corte del inserto desgastado se examinó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM Tescan Vega 3 SB) y espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS) en áreas y zonas puntuales.

2. RESULTADOS Y DISCUSIONES

2.1 MORFOLOGIA DEL RECUBRIMIENTO

En investigaciones anteriores, se establecen el espesor entre los $1,9\mu\text{m} \pm$ y $13,7\mu\text{m} \pm 0.2$ para recubrimientos de carburos de niobio y carburos de vanadio por la técnica TRD con el mismo acero herramienta como sustrato.[21],[13] La micrografía de Figura 2, sección transversal, se observa una capa homogénea de carburos binarios de NbC-VC con regularidad de espesor A entre $9,7\mu\text{m}$ y $9,86\mu\text{m}$ se presenta en los insertos de corte.

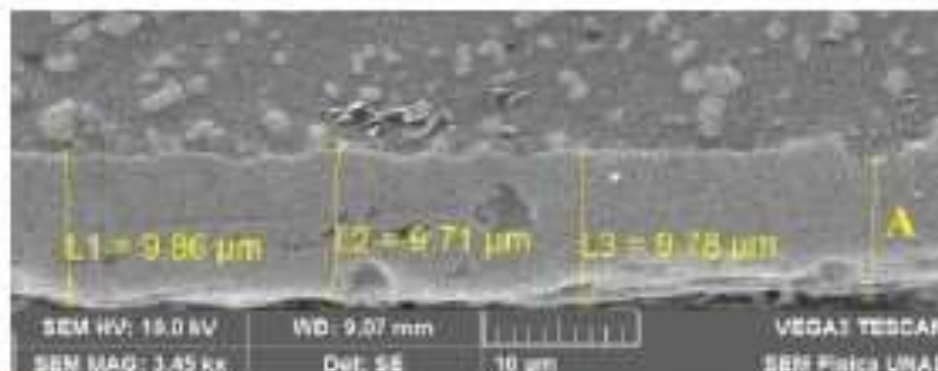


Figura 2. Imagen SEM Sección transversal de la capa de NbC-VC: con espesor A entre $9,7\mu\text{m}$ y $9,86\mu\text{m}$

La microestructura en sección transversal se obtuvo valores de dureza para el recubrimiento de NbC-VC de 2103 ± 230 HV estos valores están de acuerdo en trabajos reportados en la bibliografía [22],[10] y para los valores de dureza del inserto sin recubrimiento fue de 695 ± 11 HV respectivamente.

La formación de la microestructura del recubrimiento depende de la nucleación y el comportamiento de crecimiento del porcentaje de carbono del sustrato[23]. En el caso de NbC, los recubrimientos crecen para dar capas cuyo espesor es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de inmersión[24] y muestra una transición de granos muy finos a granos finos equiaxiales [7]. Para el recubrimiento de carburo de vanadio los granos de tamaño submicrométrico inicialmente formados crecieron en granos de tamaño micrómetro durante el tiempo de inmersión[24],[25] y el estudio [26] para el VC se forma el recubrimiento en tres etapas; nucleación primaria crecimiento, generación de granos muy finos, y crecimiento de recubrimientos

gruesos por deposición sucesiva de granos columnares con fuertes orientaciones preferentes o granos equiaxiales con orientaciones aleatorias.

El recubrimiento de carburos binarios de niobio y vanadio sobre el inserto por 4 horas de tratamiento TRD a 1050°C y revenido de 10 minutos a temperatura de 540°C. La capa fue atacada con una solución de (KOH) + 10%K₃[Fe (CN)₆] por 40 segundos de inmersión, donde se alcanza observar en la imagen SEM Figura 3 A y B una posible formación granular de regiones de carburos al límite de capa, de solución sólida por sustitución de granos, equiaxiales (punto II) desde la interfaz de la capa y el sustrato (punto I), [23], [25],[27][28]. Se observa la nucleación de granos columnares hacia la superficie de la capa (punto III Figura 3. A,B) posiblemente porque el comportamiento de crecimiento del niobio es más visible gracias a sus energías libres de formación y poca concentración de vanadio, debido a una menor difusión de átomos[7].

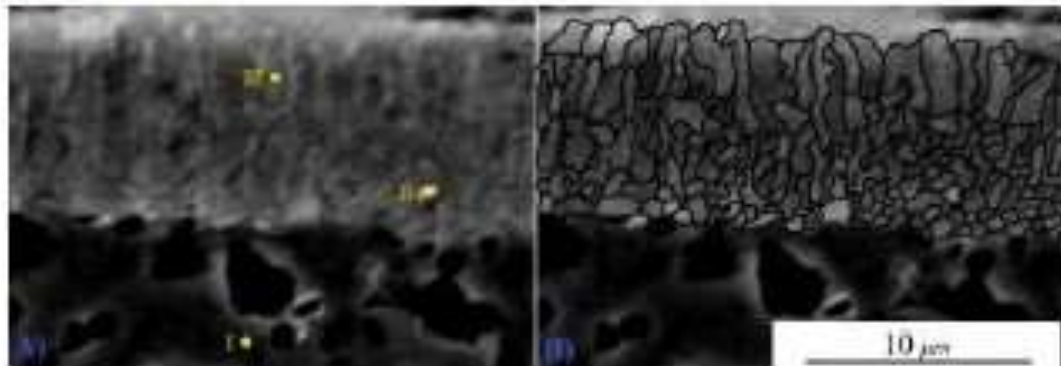


Figura 3. Morfología del grano atacada de la capa de NbC-VC: Figuras A),B) punto I sustrato acero M2, punto II grano equiaxial y punto III grano columnar.

2.2 COMPOSICION QUIMICA ELEMENTAL DEL RECUBRIMIENTO

Se observa los resultados por espectrometría de dispersión de energía (EDS) en la Figura 4 para el recubrimiento superficial del inserto, donde confirma la presencia de elementos formadores de carburo de niobio con 72.95% en peso como elemento principal en composición química, luego del vanadio con 16% en peso. También hay presencia de otros elementos como hierro y tungsteno. Para los insertos recubiertos con este tipo de porcentajes de elementos de Nb y V se evaluara su desempeño de corte con respecto a insertos templados sin recubrimiento de acuerdo a las condiciones de maquinado.

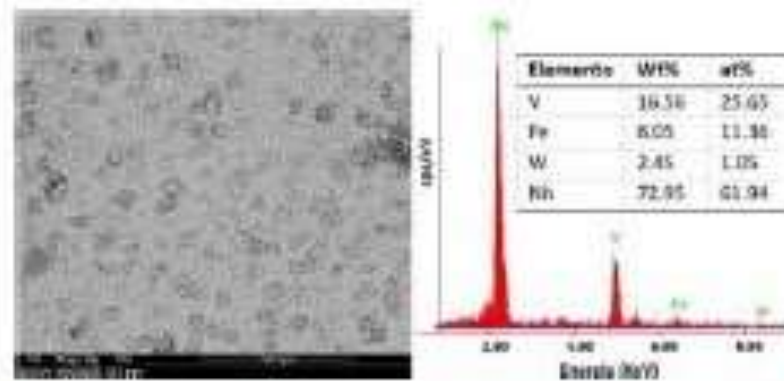


Figura 4. Patrón EDS de mapeo superficial del recubrimiento de NbC-VC

2.3 DIFRACCION DE RAYOS X DEL RECUBRIMIENTO Y SUSTRATO

En la Figura 5, se muestran los patrones de difracción por rayos X del sustrato de acero herramienta M2. La Figura 5 A) corresponde a picos de hierro Fe con planos cristalográficos (hkl) de (110), (200) y (211). Para los recubrimientos producidos sobre los insertos de corte se evidenciaron carburos binarios de carburo de niobio (NbC) y capas de carburo de vanadio (VC) se utilizó TRD a 1050°C en tiempo de 4 horas de tratamiento[29] y posteriormente se da un revenido temperatura de 540°C por 10 minutos. De acuerdo con la base de datos (NbC- JCPDS 03-065-8783) del software High score plus, en la Figura 5 B) se evidencia una estructura cristalina FCC, cuyos planos cristalográficos tienen orientaciones en picos de (111), (200), (220), (222) y (400). Además, se observa presencia de NbC, donde el ángulo 2 Theta corresponde a 35.073, 40.72, 58.949, 74.116 y 88.189. Para los carburos de vanadio (VC), la base de datos (VC – JCPDS-03-065-8074) muestra picos de alta intensidad (37.376, 43.429) en planos cristalográficos con orientaciones (111) y (200), en ángulos 2 Theta en cada fase. Los recubrimientos obtenidos demostraron la difusión de la capa y una mayor solución sólida de NbC debido al que el niobio tiene una mayor solubilidad y energía libre de formación (-33,6Kcal) y los carburos de vanadio son de menor energía (-24Kj/mol)[11],[30].

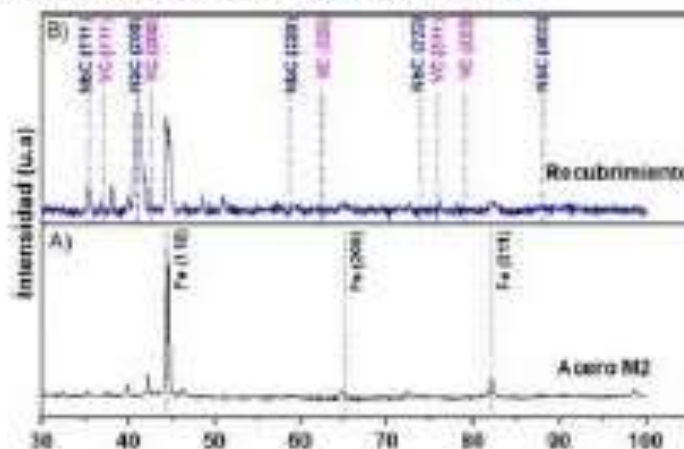


Figura 5. Análisis de difracción de rayos X en la superficie: A) sustrato acero M2 y B) recubrimiento binario de carburo de niobio y vanadio

2.4 DESEMPEÑO DEL DESGASTE DE INSERTOS CON Y SIN RECUBRIMIENTO

Los autores de [31],[32] afirman que el desgaste en las herramientas de corte es gradual al proceso, donde depende del material de fabricación de la pieza de trabajo a maquinar, materiales de las herramientas, condiciones de corte, refrigerante y otros. La máquina de medición de herramienta [33],[34] es un equipo Zoller con dispositivo de ajuste y medición, equipado con cámara, tres ejes CNC lineales y dos rotativos controlados con programa de medición de contornos del inserto. El diagrama esquemático [35] del desgaste típico del flanco de la herramienta de corte (VB) se obtiene aproximándose por el ancho total del área de desgaste de la herramienta.

Los parámetros de corte de insertos con recubrimientos se muestran en la Figura 6, en los insertos (A), (B) presento un desgaste $VB = 0.103$ y 0.117 mm con velocidades de corte $V_c = 20, 30$ m/min sin embargo se evidencio más desgaste en insertos con $V_c = 40$ y 60 m/min Figura 6 (C), (D) con valores de $VB = 0.250$ y 0.255 mm en el flanco de corte. Los insertos recubiertos muestra mejor resistencia al desgaste con velocidades de corte bajas aunque con velocidades de corte mayor de 40 m/min probablemente debido al aumento de revoluciones del husillo y velocidad de avance de la mesa los insertos no estaba en capacidad de soportar su fuerza de corte en el maquinado[36].

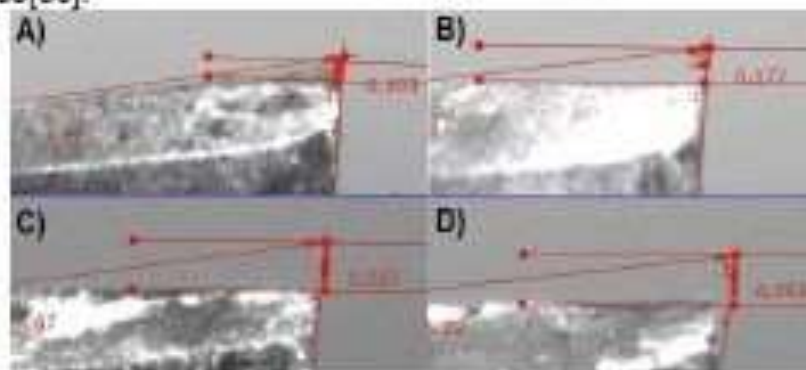


Figura 6. Desgaste del flanco VB de Insertos recubiertos de NbC-VC, condiciones de corte: A) 20, B) 30, C) 40 y D) 60 m/min.

Los resultados de los insertos sin recubrimientos se observa un mayor deterioro en el filo de corte, se muestra un desgaste en el flanco de corte VB Figura 7 en los insertos A 0.205 mm, B 0.257 mm, C 0.271 mm y D 0.279 mm. Al maquinar material de trabajo platina acero AISI 4140 es posible a que se deba por su porcentaje de carbono, aleantes y dureza, produce más esfuerzo durante el maquinado del inserto sin recubrir tiende a aumentar un alto desgaste en el flanco de corte.

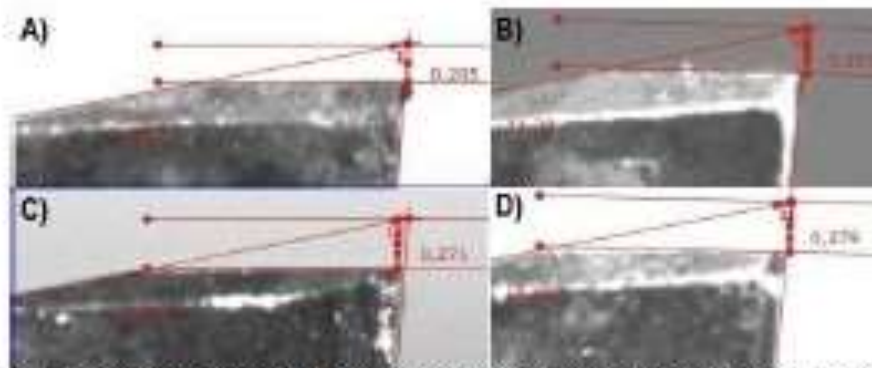


Figura 7. Desgaste del flanco VB de Insertos sin recubrimiento, condiciones de corte: A) 20, B) 30, C) 40 y D) 60m/min

La figura 8 A), evidencia una mayor vida útil en insertos recubiertos NbC-CV, por su menor desgaste del flanco VB a velocidades de corte $V_c=20, 30, 40$ m/min, aunque presentó un aumento de desgaste por abrasión y adhesión al inserto recubierto con $V_c=60$ m/min a una longitud de maquinado de 39 mm.

Los insertos sin recubrir con el maquinado del material de trabajo acero AISI 4140 de la Figura 8 B) muestra un mayor desgaste en el flanco de corte con $V_c=30, 40$ y 60 m/min a una longitud de maquinado 1 a 3 mm sin embargo con velocidad de corte baja de 20 m/min presento un leve desgaste y longitud de maquinado de $30,5$ mm. Un tipo de falla de la herramientas y medida apropiada [37] presenta deterioro en la rugosidad de la superficie y precisión dimensional al flanco de corte y ángulos de inclinación. Estos insertos evidencia la poca eficiencia de corte ya que no fue el adecuado para este tipo de fuerzas de corte durante el maquinado provocando un deterioro al inserto.

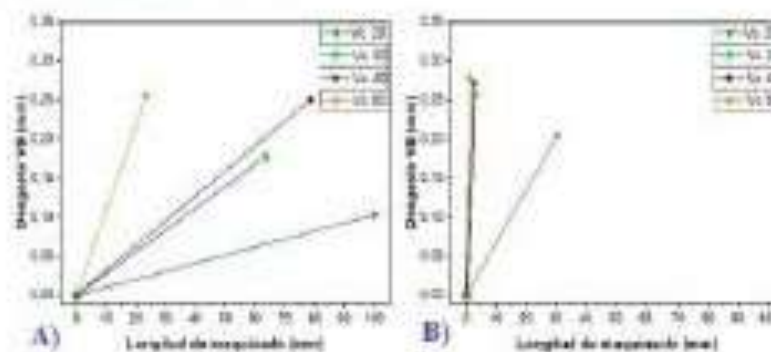


Figura 8. Gráfica desgaste del flanco de corte VB en función de la longitud de maquinado de Insertos con $V_c=20, 30, 40$ y 60 m/min en materiales de trabajo acero AISI 4140 en: A) Insertos recubiertos y B) Insertos sin recubrir.

La morfología del desgaste del inserto recubierto de carburos binarios fue evaluada por microscopia SEM donde se observó en su cara frontal la Figura 9 (A) presencia de desgaste adhesivo –abrasivo en el flanco de corte del inserto y la Figura 9 (B) adherencia del material en borde aumentado [38](build up edge de posible material de trabajo acero AISI 4140 al mecanizar con velocidad de corte $V_c=20$ m/min. La Figura 9(C) se observan análisis por EDS de fragmento de capa en la zona puntual

I de composición química, Nb 35.54%at y V 15.17%at. Al acumularse el material en el borde del inserto, indica una tendencia a producir desgaste adhesivo - abrasivo en el flanco de corte [5], en que además, aumenta su temperatura al elevar la velocidad de corte y un avance de recorrido.

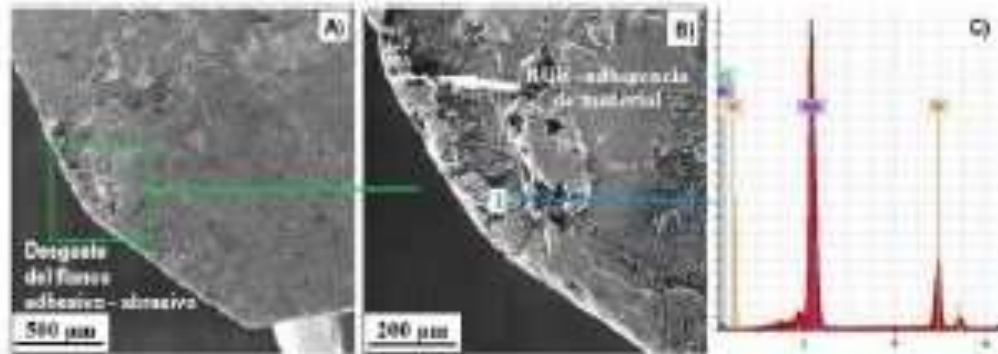


Figura 9. Micrografía SEM de flanco de corte de Inserto recubierto de NbC-VC: (A) desgaste adhesivo-abrasivo (B) adherencia de material y (C) análisis EDS en el punto I a velocidad de corte de 20 m/min maquinando acero 4140.

3. CONCLUSIONES

Los recubrimientos de NbC-VC sobre los insertos están compuestos de granos, equiaxados y columnares. La capa tiene un valor de $9,86 \pm 0,203 \mu\text{m}$ de espesor y dureza promedio de $2103 \pm 100 \text{ HV}$. Usando DRX, se confirmó que los recubrimientos estaban formados por compuestos de carburos binarios de NbC y VC con una estructura cristalina FCC, donde se observan planos cristalográficos, con orientaciones en picos de (111), (200).

El estudio de recubrimientos binarios a insertos de NbC-VC obtuvo un mejor desempeño en velocidades de corte $V_c = 20, 30 \text{ m/min}$ y un leve desgaste en insertos con $V_c = 40$ y 60 m/min . En los insertos sin recubrir apareció un crecimiento brusco de desgaste en el flanco de corte en todas las velocidades de corte. La posible relación del desgaste de estos insertos es debido al avance por diente no fue el adecuado para estas condiciones de corte y material de trabajo. Una evaluación más metódica para la aplicación de recubrimientos a este tipo de herramienta de corte se requiere más investigación, para así competir con herramientas del sector industrial y metalmeccánico.

AGRADECIMIENTOS

José Helmer Martínez, Jhon Jairo Olaya Flórez, Johnny Obando contribuyeron en el desarrollo de los experimentos y caracterización del proceso del recubrimiento y maquinado. Gracias a la prestación de servicios de los laboratorios de maquinado, tratamientos térmicos de la Universidad Inco de Colombia y laboratorio de

tratamientos térmicos, microscopios SEM departamento de Física, Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. S. Murthy and I. Rajendran, (2012) "Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 253–261, DOI 10.1590/s1678-58782012000300005.
- [2] Y. Xing, J. Deng, K. Zhang, X. Wang, Y. Lian, and Y. Zhou, (2015) "Fabrication and dry cutting performance of Si₃N₄/TiC ceramic tools reinforced with the PVD WS₂/Zr soft-coatings," *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 8, pp. 10261–10271, DOI 10.1016/j.ceramint.2015.04.153.
- [3] C. Escobar, M. Villareal, W. Aperador, and P. Prieto, (2014) "Tribological and wear behavior of HfN / VN nano-multilayer coated cutting tools," *Ing. E Investig.*, vol. 34, no. 1, pp. 22–28.
- [4] L. H. Moreno, J. C. Caicedo, G. B. Gaitan, F. Martínez, and P. P. Pulido, (2011) "Desempeño de insertos de WC recubiertos con nanomulticapas de [TiN/TiAlN] en el mecanizado del acero endurecido AISI 4340," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 58, pp. 85–94.
- [5] B. Koyilada, S. Gangopadhyay, and A. Thakur, (2016) "Comparative evaluation of machinability characteristics of Nimonic C-263 using CVD and PVD coated tools," *Measurement*, vol. 85, pp. 152–163, DOI 10.1016/j.measurement.2016.02.023.
- [6] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, and D. Larrouquere, (2007) "Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools," *Wear*, vol. 262, no. 7–8, pp. 931–942, DOI 10.1016/j.wear.2006.10.009.
- [7] T. Arai, (1993) "Behavior of nucleation and growth of carbide layers on alloyed carbide particles in substrates in salt bath carbide coating," *Thin Solid Films*, vol. 229, no. 2, pp. 171–179, DOI 10.1016/0040-6090(93)90360-2.
- [8] F. A. Orjuela-Guerrero, J. E. Alfonso-Orjuela, and J. J. Olaya-Flórez, (2015) "Efecto de la adición de V en la dureza, adherencia y el coeficiente de fricción de recubrimientos de VC producidos mediante depósito termo-reactiva/difusión," *DYNA*, vol. 82, no. 194, pp. 178–184, DOI 10.15446/dyna.v82n194.49243.
- [9] F. E. Castillejo, D. M. Marulanda, J. J. Olaya, and J. E. Alfonso, (2014) "Wear and corrosion resistance of niobium-chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 254, pp. 104–111, DOI 10.1016/j.surfcoat.2014.05.069.
- [10] M. A. Ramírez ramos, J. J. Olaya flores, and V. J. Trava-airoldi, (2015)

- "Evaluación tribológica de recubrimientos de NbV y VC sobre acero AISI D2 producidos por la técnica deposición difusión termo-reactiva," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 16, no. 2, pp. 287–294, DOI 10.1016/j.riit.2015.03.012.
- [11] F. E. Castillejo Nieto, J. J. Olaya-Florez, and J. E. Alfonso, (2015) "Wear resistance of vanadium-niobium carbide layers grown via TRD," *Dyna*, vol. 82, no. 193, pp. 104–109, DOI 10.15446/dyna.v82n193.46657.
- [12] F. E. Castillejo Nieto and J. J. Olaya Flórez, (2012) "VC and NbC coatings produced by TRD – an environmentally clean, inexpensive and effective technology," *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 22, pp. 95–105.
- [13] D. Toro, D. M. Marulanda, J. J. Olaya, B. A. Páez-Sierra, and F. E. Castillejo, (2018) "Properties and in-service performance of components treated with thermo reactive deposition/diffusion," *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 26, no. 3, pp. 440–447, DOI 10.4067/s0718-33052018000300440.
- [14] D. A. Toro Gil, (2014) "Evaluación de desempeño en servicio de elementos de corte recubiertos con carburo de niobio depositado usando la técnica de depósito usado la técnica de deposición difusión termorreactiva," Universidad Antonio Nariño.
- [15] T. Arai, (1992) "Tool materials and surface treatments," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 35, no. 3–4, pp. 515–528, DOI 10.1016/0924-0136(92)90338-S.
- [16] ISO, (1989) *Tool Life Testing in Milling ISO 8688 part-1*. Geneva: International Organization for Standardization.
- [17] Palvit, (2017) "Catálogo de herramientas de fresado-Inserto SPKN 1203 EDTR," *Catálogo general inserto de corte fresado*. [Online]. Available: https://www.palbit.pt/catalog/files_en/assets/basico-html/page20.html. [Accessed].
- [18] A. Iirsacero, (2019) "Acero M2 - Ficha técnica." [Online]. Available: <http://iirsacero.com.mx/wp-content/uploads/2019/08/Ficha-Técnica-Acero-M-2-iirsacero.pdf>. [Accessed].
- [19] SISA, (2012) "Ficha técnica acero rápido M2." [Online]. Available: <http://sisa1.com.mx/pdf/Acero SISA M2.pdf>. [Accessed].
- [20] ASM Handbook Committee, (2004) "Metallography and Microstructures of Refractory Metals and Alloys," in *Metallography and Microstructures*, vol. 9, ASM International, DOI 10.31399/asm.hb.v09.a0003777, pp. 877–888.
- [21] C. K. N. Oliveira, R. M. Muñoz Riofano, and L. C. Casteletti, (2006) "Micro-abrasive wear test of niobium carbide layers produced on AISI H13 and M2 steels," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 200, pp. 5140–5144, DOI 10.1016/j.surfcoat.2005.05.037.
- [22] F. A. Orjuela Guerrero, (2013) "Resistencia a la corrosión en recubrimientos de carburo de vanadio y carburo de niobio depositados con la técnica TRD," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

- [23] X. S. Fan, Z. G. Yang, Z. X. Xia, C. Zhang, and H. Q. Che, (2010) "The microstructure evolution of VC coatings on AISI H13 and 9Cr18 steel by thermo-reactive deposition process," *J. Alloys Compd.*, vol. 505, no. 1, pp. 15–18, DOI 10.1016/j.jallcom.2010.06.064.
- [24] T. Arai and S. Moriyama, (1995) "Growth behavior of chromium carbide and niobium carbide layers on steel substrate, obtained by salt bath immersion coating process," *Thin Solid Films*, vol. 259, no. 2, pp. 174–180, DOI 10.1016/0040-6090(94)06452-0.
- [25] X. S. Fan, Z. G. Yang, C. Zhang, Y. D. Zhang, and H. Q. Che, (2010) "Evaluation of vanadium carbide coatings on AISI H13 obtained by thermo-reactive deposition/diffusion technique," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 205, no. 2, pp. 641–646, DOI 10.1016/j.surfcoat.2010.07.065.
- [26] T. Arai and S. Moriyama, (1994) "Growth behavior of vanadium carbide coatings on steel substrates by a salt bath immersion coating process," *Thin Solid Films*, vol. 249, no. 1, pp. 54–61, DOI 10.1016/0040-6090(94)90085-X.
- [27] C. Sun, Q. Xue, J. Zhang, S. Wan, A. K. Tieu, and B. H. Tran, (2018) "Growth behavior and mechanical properties of Cr-V composite surface layer on AISI D3 steel by thermal reactive deposition," *Vacuum*, vol. 148, pp. 158–167, DOI 10.1016/j.vacuum.2017.11.015.
- [28] A. Ghadi, M. Soltanieh, H. Saghafian, and Z. G. Yang, (2017) "Growth kinetics and microstructure of composite coatings on H13 by thermal reactive diffusion," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 325, pp. 318–326, DOI 10.1016/j.surfcoat.2017.06.068.
- [29] F. E. Castillejo, D. Marulanda, O. Rodriguez, and J. Olaya, (2011) "Electrical furnace for producing carbide coatings using the thermoreactive deposition/diffusion technique," *Dyna*, vol. 78, no. 170, pp. 192–197.
- [30] L. Worrell and J. Chipman, (1964) "The free energies of formation of the vanadium, niobium, and tantalum carbides," *Vacuum*, vol. 14, no. 84 m, p. 282.
- [31] B. Wang and Z. Liu, (2016) "Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 55, pp. 24–32, DOI 10.1016/j.jmhm.2015.11.004.
- [32] American Society for Metals, (1989) *Metals Handbook, Machining*, Ninth., vol. 16. Ohio, USA: Metals Park.
- [33] C. Zoller, (2016) "Zoller Smille BRSMI03-ES." [Online]. Available: <https://documents.site/zoller-smile-brsmi03-es.html>. [Accessed].
- [34] G. T. Smith, (2008) *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*. London: Springer, DOI 10.1016/b978-034063195-9/50041-9.
- [35] C. Wang, W. Ming, and M. Chen, (2016) "Milling tool's flank wear prediction by temperature dependent wear mechanism determination when machining Inconel 182 overlays," *Tribology Int.*, vol. 104, pp. 140–156, DOI

10.1016/j.triboint.2016.08.036.

- [36] M. Thomas and Y. Beauchamp, (2003) "Statistical investigation of modal parameters of cutting tools in dry turning," vol. 43, pp. 1093–1106, DOI 10.1016/S0890-6955(03)00131-7.
- [37] S. Chinchanihar and S. K. Choudhury, (2015) "International Journal of Machine Tools & Manufacture Machining of hardened steel — Experimental investigations , performance modeling and cooling techniques : A review," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 89, pp. 95–109, DOI 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.002.
- [38] A. Altin, M. Nalbant, and A. Taskesen, (2007) "The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 9, pp. 2518–2522, DOI 10.1016/j.matdes.2006.09.004.

Bibliografía

- [1] F. E. Nieto Castillejo, "Recubrimientos de Carburos Ternarios Depositados con la Técnica TRD.," Universidad Nacional de Colombia, Medellin, 2013.
- [2] M. A. Ramírez ramos, J. J. Olaya flores, and V. J. Trava-airoldi, "Evaluación tribológica de recubrimientos de NbV y VC sobre acero AISI D2 producidos por la técnica deposición difusión termo-reactiva," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 16, no. 2, pp. 287–294, 2015.
- [3] A. de LLodio, *Tratamientos termicos de herramientas de acero*. Bilbao (españa): Bilbo: Urmo, 1978.
- [4] Palvít, "Catalogo de herramientas de fresado-Inserto SPKN 1203 EDTR.," *Catalogo general inserto de corte fresado*, 2017. [Online]. Available: https://www.palbit.pt/catalog/files_en/assets/basic-html/page20.html.
- [5] Bholer, "acero AISI 4140 -V 320," *Manual de acero especiales*, 2011. [Online]. Available: <https://www.constantinodelgado.com/catalogosgratis/aceros-bohler/aceros-bohler-0053>.
- [6] Bholer, "Acero AISI 1045- V 945," *Manual de acero especiales*, 2011. [Online]. Available: <https://www.constantinodelgado.com/catalogosgratis/aceros-bohler/aceros-bohler-0055>.
- [7] C. Zoller, "Zoller Smille BRSMI03-ES," 2016. [Online]. Available: <https://vdocuments.site/zoller-smile-brsmi03-es.html>.
- [8] M. Aghaie-Khafri and F. . Fazlalipour, "Kinetics of V (N , C) coating produced by a

- duplex surface treatment,” *Surfaces Coatings Technol.*, vol. 202, pp. 4107–4113, 2008.
- [9] J. R. Davis, *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. Ohio, USA: ASM International, 2001.
- [10] ASM International Handbook Committee, *Heat Treating*, vol. 4. Ohio: Metals Park, 1991.
- [11] M. A. Ramírez Ramos, “evaluación de la resistencia al desgaste de recubrimientos de carburos de niobio (NbC), carburos de vanadio (VC) y carburos ternarios de niobio y vanadio (NbVC) producidos por la técnica de deposición por difusión termo-reactiva (TRD),” Universidad Nacional de Colombia, Bogota, 2013.
- [12] E. Abakay, S. Sen, and U. Sen, “Effect of Aluminum Addition to Nb-Al-C-N Coatings on AISI M2 Steel Obtained by Thermo-Reactive Deposition Technique,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 129, no. 4, pp. 653–655, 2016.
- [13] C. K. N. Oliveira, R. M. Muñoz Riofano, and L. C. Casteletti, “Micro-abrasive wear test of niobium carbide layers produced on AISI H13 and M2 steels,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 200, pp. 5140–5144, 2006.
- [14] U. Sen, S. S. Pazarlioglu, and S. Sen, “Niobium boride coating on AISI M2 steel by boro-niobizing treatment,” *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 16, pp. 2444–2446, 2008.
- [15] I. Hacisalihoglu, F. Yildiz, and A. Alsaran, “Wear performance of different nitride-based coatings on plasma nitrided AISI M2 tool steel in dry and lubricated conditions,” *Wear*, vol. 384–385, pp. 159–168, 2017.
- [16] F. E. Castillejo Nieto and J. J. Olaya Flórez, “VC and NbC coatings produced by TRD – an environmentally clean, inexpensive and effective technology,” *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 22, pp. 95–105, 2012.
- [17] D. B. Varas, F. Castillejo, and D. Marulanda, “Deposición de Carburo de Niobio por la Técnica de Deposición / Difusión Termorreactiva (TRD) en Aceros de Bajo Carbono,” *ingecuan*, no. Cim, pp. 56–58, 2011.
- [18] F. E. Castillejo Nieto, J. J. Olaya-Florez, and J. E. Alfonso, “Wear resistance of vanadium-niobium carbide layers grown via TRD,” *Dyna*, vol. 82, no. 193, pp. 104–109, 2015.
- [19] F. E. Castillejo, D. Marulanda, O. Rodriguez, and J. Olaya, “Electrical furnace for

- producing carbide coatings using the thermoreactive deposition/diffusion technique.,” *Dyna*, vol. 78, no. 170, pp. 192–197, 2011.
- [20] F. E. Castillejo, “Production of vanadium carbides and chromium carbides on steels AISI D2 using the TRD technique,” *Cienc. Desarro. Innov. Univ. St. Tomas*, pp. 27–30, 2015.
- [21] F. E. Castillejo, D. M. Marulanda, J. J. Olaya, and J. E. Alfonso, “Wear and corrosion resistance of niobium-chromium carbide coatings on AISI D2 produced through TRD,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 254, pp. 104–111, 2014.
- [22] F. E. Castillejo, D. Marulanda, and J. J. Olaya, “Estudio de recubrimientos de carburos ternarios de niobio-vanadio producidos sobre acero D2 usando la técnica de deposición por difusión termorreactiva.,” *LatinAm.Metal.Mat.*, vol. 2, no. 2, pp. 134–137, 2011.
- [23] F. A. Orjuela Guerrero, “Resistencia a la corrosión en recubrimientos de carburo de vanadio y carburo de niobio depositados con la técnica TRD,” Universidad Nacional de Colombia, Bogota, 2013.
- [24] A. Orjuela G and R. Rincon R, “Recubrimientos de carburos de metales de transición obtenidos por difusión termo-reactiva,” *Tecnoesufa*, p. 6, 2015.
- [25] A. Orjuela G, R. Rincón, and J. J. Olaya, “Corrosion resistance of niobium carbide coatings produced on AISI 1045 steel via thermo-reactive diffusion deposition,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 259, no. PC, pp. 667–675, 2014.
- [26] S. A. Castro Hermosa, “Resistencia a la corrosión de recubrimientos bicapa VXNbYCZ/BiXTiYOZ depositados sobre acero para herramientas,” Universidad Nacional de Colombia, Bogota, 2014.
- [27] S. Castro, J. edgar Alfonso, and J. jairo Olaya, “Electro chemical characterization of VXNbYCZ - BiXTiYOZ coatings produced through thermo-reactive diffusion and the sputtering technique,” *Rev. Mex. Fis.*, vol. 62, pp. 138–143, 2016.
- [28] D. Toro, D. M. Marulanda, J. J. Olaya, B. A. Páez-Sierra, and F. E. Castillejo, “Properties and in-service performance of components reated with thermo reactive deposition/diffusion,” *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 26, no. 3, pp. 440–447, 2018.
- [29] D. A. Toro Gil, “Evaluacion de desempeño en servicio de elementos de corte recubiertos con carburo de niobio depositado usando la tecnica de deposito usado la tecnica de deposición difusión termorreactiva,” Universidad Antonio Nariño, 2014.

- [30] T. Arai, "Tool materials and surface treatments," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 35, no. 3–4, pp. 515–528, Oct. 1992.
- [31] M. P. de andres Saenz, *El diagrama hierro-carbono y los fundamentos de los tratamientos térmicos*. Madrid: Montecorvo, 1962.
- [32] F. S. Chen, P. Y. Lee, and M. C. Yeh, "Thermal reactive deposition coating of chromium carbide on die steel in a fluidized bed furnace," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 53, no. 1, pp. 19–27, 1998.
- [33] R. Soltani, M. H. Sohi, M. Ansari, A. Haghighi, H. M. Ghasemi, and F. Haftlang, "Evaluation of niobium carbide coatings produced on AISI L2 steel via thermo-reactive diffusion technique," *Vaccum*, vol. 146, pp. 44–51, 2017.
- [34] ASTM International, *Standard Specification for Tool Steel High Speed A600-92a*, vol. i, no. Reapproved 2016. Annual Book of ASTM Standards, 2017.
- [35] H. H. Suarez Soler, "Evaluación del comportamiento en condiciones de operación de aceros de baja y media aleación, con recubrimiento superficial por el proceso deposición difusión termorreactiva (TRD)," Universidad Nacional de Colombia, Bogota, 2003.
- [36] BÖHLER, "Acero rapido S600-M2- ficha tecnica," 2016. [Online]. Available: <http://www.bohlercolombia.com/media/productdb/downloads/S600DE.pdf>.
- [37] SISA, "Ficha tecnica acero rapido M2," 2012. [Online]. Available: <http://sisa1.com.mx/pdf/Acero SISA M2.pdf>.
- [38] A. Cuervo, J. E. Muñoz, F. F. Vallejo Bastidas, and J. J. Olaya, "Recubrimientos de carburos Nb-V-Cr depositados mediante el proceso de difusión Termo-reactiva (TRD)," *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 25–2, pp. 5–20, 2015.
- [39] A. A. Amaya Avila, O. E. Piamba Tulcan, and J. J. Olaya-Florez, "Vanadium carbide coatings produced on gray cast iron using the thermo-reactive deposition / diffusion technique," *Ing. mecánica, Tecnol. y Desarro.*, vol. 5, no. 3, pp. 333–338, 2015.
- [40] T. Arai, "Behavior of nucleation and growth of carbide layers on alloyed carbide particles in substrates in salt bath carbide coating," *Thin Solid Films*, vol. 229, no. 2, pp. 171–179, 1993.
- [41] K. Cheng, *Machining Dynamics Fundamentals, Applications and Practices*.

- London: Springer, 2010.
- [42] O. I. Carrero Sandoval and J. M. Rincon Cepeda, "Obtención de recubrimientos de carburos ternarios y cuaternarios por medio de la tecnica de difusion termo-reactiva (TRD), y caracterización de la resistencia al desgaste frente a un recubrimiento de diamante policristalino conforme a la tecnica de pin o," Fundacion Universitaria los Libertadores, 2016.
- [43] M. Biesuz and V. M. Sglavo, "Chromium and vanadium carbide and nitride coatings obtained by TRD techniques on UNI 42CrMoS4 (AISI 4140) steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 286, no. Aisi 4140, pp. 319–326, 2016.
- [44] C. Marin Villar, "Tantalio y Niobio : Metales Refractarios," *Met. ACTUAL*, vol. 16, pp. 16–23, 2010.
- [45] G. J. Simandl and R. O. Burr, "Tantalum and Niobium: Deposits, Resources, Exploration Methods and Market – A Primer for Geoscientists," *Geosci. Canada*, vol. 45, pp. 85–94, 2018.
- [46] metales y minerales Acomet, "Ferro niobio - FeNb," 2018. [Online]. Available: <http://www.acomet.es/index.php/ferroniobio>.
- [47] metales y minerales Acomet, "Ferrovanadio - FeV," 2018. [Online]. Available: <http://www.acomet.es/index.php/ferrovanadio>.
- [48] D. H. Mesa Grajales, *Principios de tribologia con enfasis en desgaste*. Colombia, Pereira: Universidad Tecnologica del Pereira, 2007.
- [49] K. Heinz Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*. Netherlands: Elsevier B.V., 1987.
- [50] K. Holmberg and A. Matthesws, *Coatings Tribology Properties, Mechanisms, Techniques and aplications in surface Engineering*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2009.
- [51] D. M. Devia Narvaez, "Mecanismos de desgaste en herramientas de conformado con recubrimientos de TiAlN por medio de sistemas PAPVD," Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [52] A. D. Sarkar, *Desgaste de metales*. Mexico D.F.: Limusa, 1999.
- [53] ASTM International, "G4TM0-17 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion." ASTM, United States, pp. 1–9, 2016.
- [54] G. Stachowiak W and B. W. Andrew, *Engineering Tribology*, vol. 3. United States of America: Elsevier B.V., 2005.

- [55] Y. Altintas, *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, 2nd ed. USA: Cambridge University Press, 2012.
- [56] P. K. Wright and E. M. Trent, *Metal Cutting*, 4th ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [57] M. C. Shaw, *Metal cutting principles*, 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005.
- [58] American Society for Metals, *Metals Handbook, Machining*, Ninth., vol. 16. Ohio, USA: Metals Park, 1989.
- [59] Sandvik, "Fresado hacia abajo vs. fresado hacia arriba," *Fresado*, 2019. [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>.
- [60] E. M. Trent, *Metal Cutting*, 2nd ed. Butterworth - Heinemann: Elsevier B.V., 1991.
- [61] S. Chincharikar and S. K. Choudhury, "Machine Tools & Manufacture Machining of hardened steel — Experimental investigations , performance modeling and cooling techniques : A review," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 89, pp. 95–109, 2015.
- [62] F. F. Vallejo Bastidas, "Erosión Corrosión de recubrimientos ternarios de carburos de Vanadio- Niobio depositados mediante la técnica TRD sobre aceros AISI H13 y AISI D2," Universidad Nacional de colombia, 2014.
- [63] B. D. Cullity, *Elements X-Ray Diffraction*. London: Addison - Wesley Publishing Company, 1956.
- [64] W. F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, 5th ed. Distrito federal: McGraw-Hill Interamericana, 2014.
- [65] B. D. Cullity and S. R. Stock, *Elements of X-Ray Diffraction*, Third. Harlow: Pearson, 2014.
- [66] ASTM International, "E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size." ASTM, United States of America, p. 28, 2014.
- [67] B. D. Cullity, *Elements of X-ray difracción*, 2nd ed. Addison - Wesley Publishing Company, 1978.
- [68] M. Faraldos and S. Perez, "Difracción De Rayos X," in *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*, 2nd ed., CSIC, Ed. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas, 2009, pp. 465–549.

- [69] Ray F. Egerton, *Physical principles of electron microscopy An Introduction to TEM, SEM, and AEM*, vol. 8, no. 12. Edmonton, Alberta, Canada: Springer, 2005.
- [70] Universidad ECCI, "Microscopio electrónico de barrido SEM ProX." Bogota, 2018.
- [71] Phenom-WorldBV, "Specification SEM Phenom ProX," 2015. [Online]. Available: https://www.phenom-world.com/downloads/specification_sheets/Product-SpecSheet_PROX_LR.pdf.
- [72] A. R. Clarke and C. N. Eberhardt, *Microscopy techniques for materials science*. USA: CRC Pres LLC, 2002.
- [73] S. Amelinckx, D. Van Dyck, J. Van Landuyt, and G. Van Tendeloo, *Handbook of Microscopy, Methods II*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1997.
- [74] D. B. Murphy, *Fundamentals of light Microscopy and Electronic Imaging*, vol. 83, no. 991. Canada: Wiley-Liss, 2001.
- [75] frederick J. Bueche and D. A. Jerde, *Fundamentos de física*, II. Mexico, D.F.: McGraw Hill, 1997.
- [76] Konrad.Hermann, *Hardness Testing. Principles and aplicaciones*, vol. 94, no. 8. Ohio: ASM International, 2012.
- [77] ASTM Standards International, *E92 -17 Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. United States, 2009, p. 27.
- [78] K. Mills, *Metallography and Microstructures - Metals Handbook.*, 9th ed., vol. 9. ASM International, 1985.
- [79] K. Geels, W. Kopp, and M. Ruckert, *Metallographic and Materialographic Specimen Preparation, Light Microscopy, Image Analysis and Hardness Testing*. West Conshohocken: ASTM International, 2007.
- [80] ASTM International, *E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*, vol. 07. United States, 2015, pp. 1–22.
- [81] ASTM International, *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens E3-11*, vol. 11. United States, 2017, p. 12.
- [82] D. A. Stephenson and J. S. Agapiou, *Metal Cutting Theory and Practice*, Third. Boca Raton: Taylor & Francis nc, 2016.
- [83] C. Escobar, M. Villareal, W. Aperador, and P. Prieto, "Tribological and wear behavior of HfN / VN nano-multilayer coated cutting tools," *Ing. E Investig.*, vol. 34, no. 1, pp. 22–28, 2014.
- [84] A. Altin, M. Nalbant, and A. Taskesen, "The effects of cutting speed on tool wear

-
- and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools,” *Mater. Des.*, vol. 28, no. 9, pp. 2518–2522, 2007.
- [85] Y. S. Liao and R. H. Shiue, “Carbide tool wear mechanism in turning of Inconel 718 superalloy,” *Wear-Elsevier*, vol. 193, pp. 16–24, 1996.
- [86] B. Denkena, J. Köhler, B. Breidenstein, A. M. Abrão, and C. E. H. Ventura, “Influence of the cutting edge preparation method on characteristics and performance of PVD coated carbide inserts in hard turning,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 254, pp. 447–454, 2014.
- [87] P. Montenegro, J. Gomes, R. Rego, and A. Borille, “Potential of niobium carbide application as the hard phase in cutting tool substrate,” *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.*, vol. 70, no. May 2017, pp. 116–123, 2018.
- [88] H. Takeyama and R. Murata, “Basic Investigation of Tool Wear,” *ASME*, no. 5, p. 5, 1963.
- [89] O. Standardization International, *Tool Life Testing in Milling ISO 8688 part-2*. Geneva, 1989.
- [90] C. Wang, W. Ming, and M. Chen, “Milling tool’s flank wear prediction by temperature dependent wear mechanism determination when machining Inconel 182 overlays,” *Tribology Int.*, vol. 104, pp. 140–156, 2016.
- [91] ISO, *Tool Life Testing in Milling ISO 8688 part-1*. Geneva: International Organization for Standardization, 1989.
- [92] M. Alauddin, M. A. El Baradie, and M. S. J. Hashmi, “Tool-life testing in the end milling of Inconel 718,” *Mater. Process. Technol.*, pp. 321–330, 1995.
- [93] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, vol. 3, no. 9. 2019.
- [94] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, “Manufacturing Engineering and Technology,” p. 1180, 209AD.
- [95] N. Michailidis, “Variations in the cutting performance of PVD-coated tools in milling Ti6Al4V , explained through temperature-dependent coating properties,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 304, pp. 325–329, 2016.
- [96] G. T. Smith, *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*. London: Springer, 2008.
- [97] Zoller, “>>Smile<<The Universal Presetting and Measuring Machine for Standard

- Tools.,” *Zoller expect great measures*, 2019. [Online]. Available: <https://www.zoller.info/us/products/presetting-measuring/vertical-devices/smile.html>.
- [98] C. Martini and A. Morri, “Face milling of the EN AB-43300 aluminum alloy by PVD- and CVD-coated cemented carbide inserts,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 29, no. 6, pp. 662–673, 2011.
- [99] V. N. Gaitonde *et al.*, “Machinability Evaluation in Hard Milling of AISI D2 Steel,” vol. 19, no. 2, pp. 360–369, 2016.
- [100] V. P. Astakhov, *Tribology of metal cutting*. Oxford: Elsevier, 2006.
- [101] M. Alauddin, “End Milling Machinability Studies for Steel, a Nickel-base Alloy (Inconel 718) and a Metal Matrix Composite,” Dublin City University, 1993.
- [102] Sandvik coromant, “Proceso de fresado,” *Fórmulas y definiciones de mecanizado*, 2019. [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx?Country=co>.
- [103] R. Abarephor, “Manual Mufla De Laboratorio Modelo 1200-110,” 2015. [Online]. Available: <http://www.abarephor.com/>.
- [104] A. G. Maquinaria, “Acero grado maquinaria AISI 4140,” *SUMITEC*. [Online]. Available: <http://www.sumiteccr.com/acero/maquinaria/AM04.pdf>.
- [105] Mctools Industrial supply, “Fresa planeadora 3” 75 grados FMA 25.4 Ref_ FP-3-I – Vertex –,” 2019. [Online]. Available: http://mctools.co/tienda_virtual/tienda/accesorios-y-herramientas/fresa-planeadora-3-75-grados-fma-25-4-ref-fp-3-i-vertex/.
- [106] J. H. Martinez Aldana, “Machining of VC and NbC coatings deposited via TRD.” XI International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum, Mexico, Playa de Carmen, 2018.
- [107] X. S. Fan, Z. G. Yang, Z. X. Xia, C. Zhang, and H. Q. Che, “The microstructure evolution of VC coatings on AISI H13 and 9Cr18 steel by thermo-reactive deposition process,” *J. Alloys Compd.*, vol. 505, no. 1, pp. 15–18, 2010.
- [108] T. Arai and S. Moriyama, “Growth behavior of chromium carbide and niobium carbide layers on steel substrate, obtained by salt bath immersion coating process,” *Thin Solid Films*, vol. 259, no. 2, pp. 174–180, 1995.
- [109] T. Arai and S. Moriyama, “Growth behavior of vanadium carbide coatings on steel substrates by a salt bath immersion coating process,” *Thin Solid Films*, vol. 249,

- no. 1, pp. 54–61, 1994.
- [110] X. S. Fan, Z. G. Yang, C. Zhang, Y. D. Zhang, and H. Q. Che, "Evaluation of vanadium carbide coatings on AISI H13 obtained by thermo-reactive deposition/diffusion technique," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 205, no. 2, pp. 641–646, Oct. 2010.
- [111] ASM Handbook Committee, "Metallography and Microstructures of Refractory Metals and Alloys," in *Metallography and Microstructures*, vol. 9, ASM International, 2004, pp. 877–888.
- [112] A. Ghadi, M. Soltanieh, H. Saghafian, and Z. G. Yang, "Growth kinetics and microstructure of composite coatings on H13 by thermal reactive diffusion," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 325, pp. 318–326, 2017.
- [113] B. Matijevi and M. Stupnisek, "Improvements in Thermoreactive Deposition of Carbide Layers," *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 151, no. 3, pp. 113–117, 2006.
- [114] C. Sun, Q. Xue, J. Zhang, S. Wan, A. K. Tieu, and B. H. Tran, "Growth behavior and mechanical properties of Cr-V composite surface layer on AISI D3 steel by thermal reactive deposition," *Vacuum*, vol. 148, pp. 158–167, 2018.
- [115] A. Ghadi, M. Soltanieh, H. Saghafian, and Z. G. Yang, "Investigation of chromium and vanadium carbide composite coatings on CK45 steel by Thermal Reactive Diffusion," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 289, pp. 1–10, Mar. 2016.
- [116] M. A. Benavidez C, "Evolución de las herramientas de corte y procesos para mejorar su rendimiento.," *Inf. Tec.*, vol. 35, pp. 9–16, 1988.
- [117] J. L. Cantero, J. Diaz Alvarrez, M. H. Miguelez, and N. C. Marin, "Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718," *Wear*, vol. 297, pp. 1–2, 2013.
- [118] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, and D. Larrouquere, "Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools," *Wear*, vol. 262, no. 7–8, pp. 931–942, 2007.
- [119] K. S. Murthy and I. Rajendran, "Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 253–261, 2012.

- [120] S. Koseki, K. Inoue, and H. Usuki, "Damage of physical vapor deposition coatings of cutting tools during alloy 718 turning," *Precis. Eng.*, vol. 44, pp. 41–54, 2016.
- [121] Y. Xing, J. Deng, K. Zhang, X. Wang, Y. Lian, and Y. Zhou, "Fabrication and dry cutting performance of Si₃N₄/TiC ceramic tools reinforced with the PVD WS₂/Zr soft-coatings," *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 8, pp. 10261–10271, 2015.
- [122] L. H. Moreno, J. C. Caicedo, G. B. Gaitan, F. Martínez, and P. P. Pulido, "Desempeño de insertos de WC recubiertos con nanomulticapas de [TiN/TiAlN] en el mecanizado del acero endurecido AISI 4340," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 58, pp. 85–94, 2011.